doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.046

禽蛋裂纹检测敲击装置力学分析与结构优化

张世庆[1]　戴其俊[1]　孙　力[2]　蔡健荣[2]　周青倩[2]　周小力[2]
(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了增强敲击响应信号对禽蛋蛋壳裂纹信息的感知能力,提高禽蛋裂纹检测的准确性,分析了敲击装置的力学模型,并以此为依据优化设计激励棒的结构参数和检测条件。力学分析发现,禽蛋的激振力脉冲形态与激励棒质量、棒头刚度和敲击速度有关;优化后的激励棒质量应小于 5.6 g,棒头采用尼龙材质;建立了冲击力能量与激励棒质量和敲击速度之间的相互关系,并建立了瞬态冲击过程的数学模型。试验结果表明,优化后激励棒对完好蛋激振力脉冲的稳定性较好,与所建立数学模型的相关系数均达到 0.92 以上;产生的力信号频带能覆盖禽蛋固有频率且具有足够的激振能量,有利于提高完好蛋与裂纹蛋的可区分性和响应信号的信噪比。

关键词: 蛋壳裂纹; 瞬态冲击; 力学分析; 结构优化; 函数化描述
中图分类号: TS253.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)05-0363-06

Mechanical Analysis and Structural Optimization of Knocking Device for Eggshell Crack Detection

ZHANG Shiqing[1]　DAI Qijun[1]　SUN Li[2]　CAI Jianrong[2]　ZHOU Qingqian[2]　ZHOU Xiaoli[2]
(1. *School of Mechanical Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *School of Food and Biological Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to enhance the ability of response signal to reflect eggshell crack information and improve the accuracy of eggshell crack detection, structural parameters and detection conditions of the excitation stick were optimally designed by dynamic experiments based on mechanical model of the knocking device. The shape of pulse produced by excitation stick was related to the weight of stick, stiffness coefficient and percussion speed according to mechanics analysis results. The spectrum of excitation pulse was analyzed. The results showed that the sensitivity of response signals for eggshell creak information can be improved by reducing the pulse width and increasing the pulse peak. The excitation pulse signal was collected by a quartz force sensor, which was analyzed to optimize the excitation stick by using force spectrum method. In order to ensure that the main lobe band of the excitation force pulse covered the natural frequency of eggs, the weight of the optimized excitation stick with nylon striking end was less than 5.6 g. The relationship model between the pulse peak and the stick percussion speed was established, which would offer a reference to select the appropriate percussion speed for different varieties of eggs. The mathematical model of the transient impulse process was established to provide the basis for the later finite element simulation. The experiment results showed that the excitation pulse produced by the optimized excitation stick had the advantage of good stability, and the correlation coefficients between the pulse of intact eggs and mathematical model were more than 0.92. Frequency band of the pulse could cover the natural frequency of eggs and the pulse had sufficient excitation energy, which were of great help to distinguish between intact eggs and crack eggs and increase the signal to noise ratio (SNR) of response signal.

Key words: eggshell crack; transient impulse; mechanical analysis; structural optimization; function description

收稿日期: 2016-08-31　修回日期: 2016-09-26
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2015BAD19B05)、中国博士后科学基金项目(2015M580401)、江苏省博士后科学基金项目(1501108C)和江苏大学高级人才科研启动基金项目(15JDG056)
作者简介: 张世庆(1962—),男,副教授,主要从事测控技术在农产品无损检测中的应用研究,E-mail: zsq@ujs.edu.cn
通信作者: 孙力(1986—),男,副教授,博士,主要从事农产品无损检测技术研究,E-mail: raulsunli@126.com

引言

禽蛋蛋壳裂纹容易导致内容物因细菌侵入而腐败变质,引发食品安全问题,因此禽蛋裂纹智能检测至关重要。

目前国内外学者对蛋壳裂纹检测进行了大量研究,其中以敲击振动响应分析方法为主。文献[1-4]利用数字信号处理方法对响应信号的滤波及特征提取进行了研究,对裂纹禽蛋的识别率达到 90%以上,但同时也发现不同研究对于信号处理方法和所提取特征存在个体性差异,其主要原因是缺少对振动响应信号产生机理的研究,不同激励方式和噪声背景均会对信号处理过程产生影响,难以保证不同敲击装置产生响应信号的一致性和稳定性;文献[5-11]以模式识别定性分析方法研究为主,根据所提取特征参数对比不同判别模型的优劣性,在一定程度上降低了信号差异性对结果的影响,且所建立的判别模型均具有较好的识别效果,但其复杂的算法对以微处理器为主的实时在线检测系统提出了较高的要求;文献[12-17]采用智能控制技术设计自动敲击装置,研究以敲击装置的软、硬件设计为主,但较少涉及对禽蛋的敲击作用力及其对产生声学和振动信号影响的研究。

本文通过自行设计的禽蛋裂纹检测装置分析冲击过程中禽蛋反作用力的变化情况,并以此为依据研究冲击过程作用机理,通过对反作用力的时频分析优化设计敲击装置结构参数和检测条件,使激励所产生频带覆盖禽蛋固有频率以提高响应信号对蛋壳品质的敏感性,并为后续响应信号分析提供基础;利用动力学分析方法对激振力信号进行函数化描述,为后续冲击形式的选择和敲击响应信号的有限元仿真提供理论依据,为实现禽蛋蛋壳裂纹在线检测提供理论指导。

1 试验装置及信号分析

本研究所采用试验装置如图 1 所示,主要包括激励棒、动态力传感器(YDL-1X 型)、电荷放大器(DHF-7 型)、同步带线性模组、步进电动机及其驱动器、DSP 开发板(TMS320F2812 型)、数据采集卡(USB-1208FS 型)及上位机等。其中 DSP 与上位机通过串口连接,根据上位机所发送的运动参数控制步进电动机驱动同步带运动,以产生检测过程中的冲击激励;激励棒在同步带的带动下实现对禽蛋的冲击动作;动态力传感器用来获取激励棒对禽蛋冲击后的反作用力;数据采集卡用于获取力传感器输出的实时电压,并传送至上位机显示和保存;上位机控制程序利用 LabVIEW 软件编写,依据鸡蛋的固有频率,将采样频率设置为 20 000 Hz。

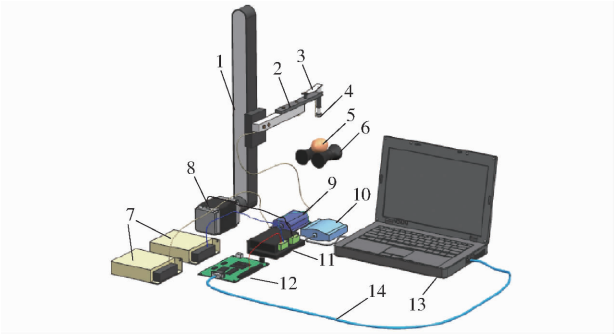


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment device

1. 同步带线性模组 2. 激励棒 3. 不锈钢薄簧片 4. 动态力传感器 5. 禽蛋 6. 辊子 7. 开关电源 8. 步进电动机 9. 电荷放大器 10. 数据采集卡 11. 步进电动机驱动器 12. DSP 开发板 13. 上位机 14. RS232 转 USB 串口线

采用该试验装置冲击完好禽蛋的激振力信号如图 2 所示,冲击产生的信号主要由 3 部分组成:第 1 部分为瞬态冲击过程信号,即激励棒与蛋壳接触瞬间所产生的冲击力信号,产生时间段为 0.9~2.2 ms,具有较高的幅值;第 2 部分为反向负信号,主要由电荷放大器内部 RC 微分电路充放电过程产生;第 3 部分为 18~21 ms 处的反弹冲击过程,该部分信号由不锈钢薄簧片的回弹力作用产生,该脉冲的峰值相对于瞬态冲击过程的力脉冲峰值较小,但其振型与瞬态冲击过程信号相似。因此,后续信号分析将以瞬态冲击过程激励信号为研究对象。

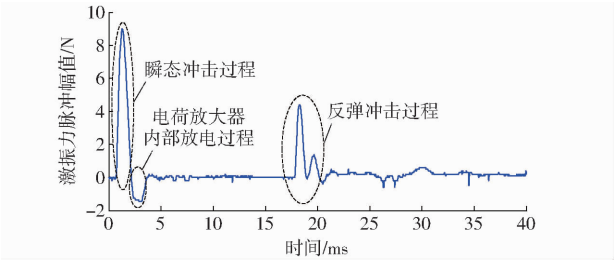


图 2 激振力信号原始波形曲线

Fig. 2 Original waveform curve of impact pulse signal

2 冲击过程动力学分析

2.1 敲击装置力学模型

激励棒的结构设计如图 3 所示,其中动态力传感器紧固于冲击头与棒体之间;为了减小冲击过程中阻力的影响,棒体和套筒均采用特氟龙材料,并通过改变棒体空心度来改变激励棒的整体质量;在棒体后端为一不锈钢薄簧片,起到卸力缓冲的作用,防止敲击力过大对禽蛋造成损伤,也可保证不同大小禽蛋冲击的一致性。

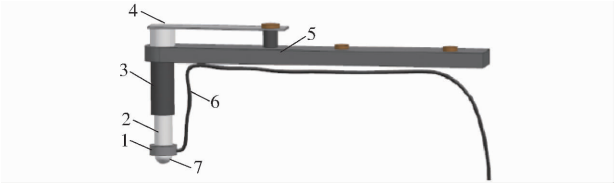


图 3　激励棒示意图

Fig. 3　Schematic diagram of excitation stick

1. 压电力传感器　2. 特氟龙棒　3. 特氟龙套筒　4. 不锈钢薄簧片　5. 力柄　6. 信号电缆　7. 冲击头

由图 2 信号变化曲线可知，冲击过程为一瞬态过程，冲击头与禽蛋接触瞬间，弹性主要集中在冲击头上，所研究的激励过程不包括不锈钢薄簧片形变过程，因此力学分析过程中不锈钢薄簧片变形量在力学模型中可忽略。

本研究将激励棒体视为一个质量为 m 的质量块，棒头视为一个无质量的弹簧，其刚度为 k。基于上述假设，将激励棒视为一个单自由度的质量-弹簧系统，其力学等效模型如图 4 所示。

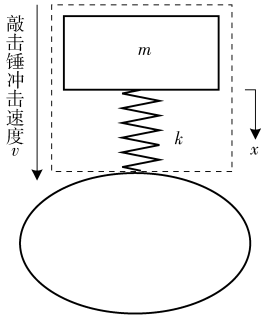


图 4　激励棒力学等效模型

Fig. 4　Mechanics model of excitation stick

当敲击禽蛋时，假设激励棒的敲击速度 $v=\dot{x}$，棒头形变位移为 x，则可以得出该系统的运动微分方程

$$m\ddot{x}+kx=0 \tag{1}$$

在初始条件为 $t=0, x=0, \dot{x}=\dot{x}_0$ 时，系统运动微分方程的自由运动解为

$$x=\begin{cases}\dfrac{\dot{x}}{\sqrt{\dfrac{k}{m}}}\sin\left(\sqrt{\dfrac{k}{m}}t\right) & \left(0\leqslant t\leqslant \pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}\right)\\ 0 & (\text{其他})\end{cases} \tag{2}$$

式中　t——时间

于是激励棒所产生的激振力脉冲为

$$f(t)=kx=\sqrt{km\dot{x}_0}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)\quad\left(0\leqslant t\leqslant \pi\sqrt{\frac{m}{k}}\right) \tag{3}$$

则有

$$f(t)=A\sin\left(\frac{\pi}{\tau}t\right)\quad(0\leqslant t\leqslant\tau) \tag{4}$$

其中

$$A=\sqrt{km\dot{x}_0}\qquad \tau=\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

式中　A——激振力脉冲峰值，N

τ——激振力脉冲宽度，ms

根据上述理论分析过程可知，激振力脉冲可采用半正弦波近似，且其形态与激励棒的自身质量 m(g)、敲击速度 v(m/s)和棒头刚度 k 有关。激励棒头刚度 k、激励棒质量 m 和敲击速度 v 越大，激振力脉冲峰值 A(N)越大；激励棒质量 m 越小，棒头刚度 k 越大，激振力脉冲的脉宽 τ(ms)越小。

2.2　激振力脉冲的力谱分析

为了进一步分析激振力脉冲的频谱特性，利用傅里叶变换对激振力脉冲 $f(t)$ 进行频率域求解，得出力谱

$$\frac{|F(f)|}{A\tau}=\frac{2}{\pi}\left|\frac{\cos(\pi\tau f)}{1-4\tau^2f^2}\right| \tag{5}$$

式中　$|F(f)|$——激振力脉冲能量

激振力脉冲傅里叶变换模与频率关系曲线如图 5 所示。从曲线图中可以看出，激振力脉冲的能量主要分布在频谱曲线的主瓣内，占据频谱曲线与坐标轴所围成的面积的大部分。频带宽度只与激振力脉冲宽度 τ 有关，频域主瓣带宽的上限频率为

$$f=\frac{3}{2\tau} \tag{6}$$

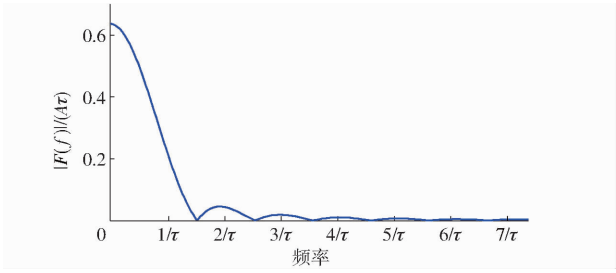


图 5　激振力脉冲傅里叶变换模与频率关系曲线

Fig. 5　Relationship curve between Fourier transforming model and frequency of impact pulse

因此，通过控制激振力的脉冲宽度 τ 和脉冲峰值 A，即减小脉冲宽度和增加脉冲峰值，使得冲击力谱的主瓣频带覆盖禽蛋自身的固有频率且具有足够的冲击能量，则可以提高敲击响应信号对禽蛋裂纹信息的感知能力。

3　敲击装置参数的优化选择

激振力脉冲信号在时域中的力脉冲宽度、脉冲峰值和频域中的主瓣带宽是评价力脉冲形态的主要参数，其中时域脉宽决定频域主瓣带宽。根据理论分析可知，激振力谱主瓣上限频率由激励棒质量和棒头刚度决定；脉冲峰值由激励棒质量、敲击速度和棒头刚度决定。因此，在敲击装置参数优化过程中，以增加主瓣上限频率为原则，优化设计激励棒质量

和棒头材质,以增加频域带宽使其达到完好禽蛋固有频率,增强敲击响应信号对裂纹信息敏感程度,进而提高完好蛋与裂纹蛋响应信号的可区分性;在不破坏禽蛋的前提下,建立激振力脉冲峰值与敲击速度的关系式,以指导不同检测对象和环境下敲击速度的选择。

3.1 激励棒参数优化

激励棒参数优化主要考虑冲击产生激振力谱主瓣频带范围可涵盖禽蛋固有频率。本文对尼龙、硬铝和不锈钢 3 种材质棒头以及不同质量棒体进行分析,建立不同材质、不同质量激励棒与激振力脉冲宽度之间的关系,并以此为依据优化激励棒的结构参数。

本研究中试验样本选自江苏省镇江市东郊农场,为产后 1 ~ 2 d 的褐色壳鸡蛋。随机选取 45 枚鸡蛋,平均分成 3 组,分别作为尼龙、硬铝和不锈钢 3 种材质棒头的试验样本。根据式(4)可知,脉冲宽度与敲击速度无关,所以选择 0.3 m/s 敲击速度进行试验。由于相同载荷作用下,鸡蛋中部承受载荷能力均低于两端[18-19],所以敲击点选择在鸡蛋的赤道部位。

由于鸡蛋个体差异会对激振力信号产生一定影响,对同一种材质棒头、同一质量的激励棒敲击产生的 15 组脉冲宽度取平均值;依据式(4)的结果,采用曲线拟合方法建立激振力脉冲宽度与质量的关系,其拟合结果如图 6 所示。试验用的激励棒由图 3 所示的压电力传感器、特氟龙棒和冲击头组成,其最小质量为 32 g,因此试验的激励棒质量以 32 g 为起始质量,分为 7 个梯度,其拟合结果如图 6 所示,其他质量的激励棒也应服从该分布。

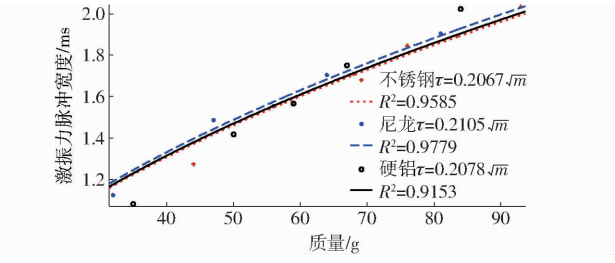


图 6 力脉冲宽度与质量拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of pulse width and weight of excitation stick

由图 6 可知,激振力脉冲宽度与激励棒质量呈正相关,而与棒头刚度呈负相关;在不同材质棒头情况下,脉冲宽度与质量具有较好的相关性,其决定系数均达到 0.91 以上;不同材质的拟合结果中系数比较接近,分别为 0.206 7、0.210 5 和 0.207 8。

通过分析可知,为了减小脉冲宽度,即提高冲击所产生激振力谱的上限频率,可通过提高刚度或减小激励棒质量实现。从图 6 中可发现,不同材质所具有的拟合系数相对比较接近,而尼龙与另外 2 种材质的密度存在较大差异,在同等体积的条件下,尼龙的质量相对较轻。为了减小激励棒质量,可选取尼龙作为激励棒头材料。

文献[20 - 22]显示,鸡蛋的共振频率在 3 000 Hz 左右,但随着蛋壳品质的不同会有所差异。为了使激振力谱主瓣覆盖 3 000 Hz 的共振频率,由式(6)计算得到激振力脉冲的宽度小于 0.5 ms;根据图 6 中尼龙材料的拟合公式可知,只有当激励棒质量小于 5.6 g 时,产生的激振力才能覆盖 3 000 Hz。可以得到激励棒的质量应小于 5.6 g。

3.2 敲击速度优化

激励棒对禽蛋的敲击速度越大,激振力脉冲峰值越大,但速度过大会对禽蛋造成损伤,所以需要选择合适的敲击速度,以确保不损伤禽蛋且力脉冲具有足够的激振能量。蛋鸡品种、生理机能、饲养方式和所处环境的不同将会导致其所产禽蛋蛋壳品质存在差异,因此对于不同品种禽蛋及不同背景噪声环境下难以采用固定的敲击速度。通过试验建立激振力脉冲峰值与敲击速度的关系式,以期对不同品种禽蛋检测时的敲击速度选择提供指导。

在试验中需要将力传感器安装于激励棒前端以获取对禽蛋的冲击力,无法直接建立激励棒质量小于 5.6 g 时的脉冲峰值与敲击速度回归模型,需要间接地建立激励棒质量与回归模型系数的关系式来确定,因此选取质量分别为 32、47、56、64、81 g 进行试验。试验中随机选取 75 枚鸡蛋,平均分成 5 组,分别作为 5 种质量的试验样本;对于不同质量、不同敲击速度下敲击同一组 15 枚鸡蛋,对 15 个力脉冲峰值取平均以消除鸡蛋个体差异的影响。不同质量激励棒产生力脉冲峰值 A(N)关于敲击速度 v(m/s)的回归模型如表 1 所示,力脉冲峰值关于敲击速度的回归模型具有较好的相关性,决定系数均在 0.90 以上。

表 1 力脉冲峰值与敲击速度的回归模型

Tab. 1 Regression models relating pulse peak to tapping speed

质量/g	回归模型	R^2
32	$A = 13.81\sqrt{v}$	0.918 2
47	$A = 15.77\sqrt{v}$	0.907 8
56	$A = 17.75\sqrt{v}$	0.973 5
64	$A = 19.19\sqrt{v}$	0.946 2
81	$A = 20.08\sqrt{v}$	0.968 2

根据表 1 中结果,采用曲线拟合方法求得质量与力脉冲峰值关于敲击速度回归模型系数的关系,拟合曲线如图 7 所示。

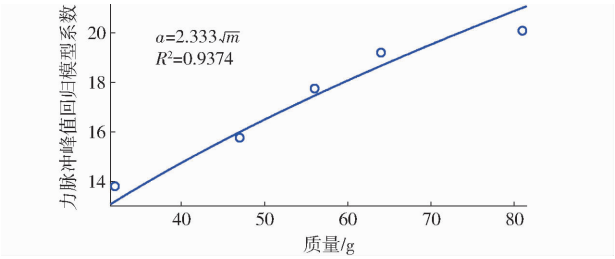


图 7　质量与力脉冲峰值回归模型系数拟合曲线

Fig. 7　Fitting curve of excitation stick weight and regression models coefficient relating pulse peak

由图 7 可得，回归模型系数与激励棒质量的拟合方程为 $a = 2.333\sqrt{m}$，其中 a 为回归模型系数。所以当激励棒质量小于 5.6 g 时，此时力脉冲峰值的回归模型系数 $a = 2.333\sqrt{m}$，即激振力脉冲峰值关于敲击速度的回归模型为 $A = 2.333\sqrt{mv}$。

3.3　激振力脉冲的函数化描述

激励棒选用尼龙材质作为激励棒头、质量 m 需要小于 5.6 g，敲击速度 v 根据检测的禽蛋品种选择确定，则激振力脉冲可以采用半正弦波函数描述为

$$f(t) = \begin{cases} 2.333\sqrt{mv}\sin\dfrac{\pi t}{0.2105\sqrt{m}} & (0 \leqslant t \leqslant 0.2105\sqrt{m}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \tag{7}$$

在激励棒冲击禽蛋蛋壳瞬间，对禽蛋的作用力逐渐增大，但随着激励棒的冲击头发生弹性形变又逐渐减小，形成一个半正弦波脉冲。在激励装置确定的基础上，对激振力脉冲进行函数描述可以为后续基础分析和敲击振动响应信号的有限元仿真提供理论依据。

4　敲击效果试验验证

为了验证优化后敲击装置产生激振力脉冲的稳定性和一致性效果，对完好蛋和裂纹蛋进行敲击试验，在激励棒结构参数和敲击速度相同的情况下，分别比较完好蛋与裂纹蛋各自受到激振力信号的稳定性以及完好蛋和裂纹蛋之间激振力信号的差异性。

试验选择江苏省镇江市东郊农场的褐色壳完好鸡蛋 40 枚作为样本，其中 20 枚在蛋的赤道附近人为制造微裂纹并标记位置，试验时将敲击点设在裂纹附近 5 mm 范围内。由于需要采集鸡蛋受到的激振力信号，将力传感器固定于激励棒前端，激励棒质量为 32 g；通过预试验发现，采用 0.55 m/s 的敲击速度对该批样本进行敲击，激振力脉冲峰值随着蛋壳品质的不同会有所差异，但均能达到 8.5 N 以上，该力所激发的能量能够满足试验要求。

完好蛋和裂纹蛋的激振力脉冲（瞬态冲击过程信号）如图 8a 所示，两者的信号有明显差异，主要表现在：裂纹蛋激振力脉冲宽度大于完好蛋、峰值小于完好蛋、曲线平滑度劣于完好蛋。这种瞬态冲击对完好禽蛋与裂纹禽蛋激振力响应特性的差异，为在线检测过程中准确识别裂纹蛋提供了有效的信息。

完好蛋和裂纹蛋的激振力脉冲与所建立数学模型的相关系数如图 8b 所示，由图可知，完好蛋的激振力脉冲与建立模型高度相关，相关系数均在 0.92 以上；裂纹蛋的激振力脉冲与所建模型的相关系数分布较为分散，随着裂纹形态的不同会有所差异，但相关系数均小于 0.8（敲击点与裂纹距离小于 5 mm 时）。因此，所建立瞬态冲击响应模型对于不同个体的完好蛋具有较强的适用性，与裂纹蛋的裂纹处及周围局部区域有明显的差异性。

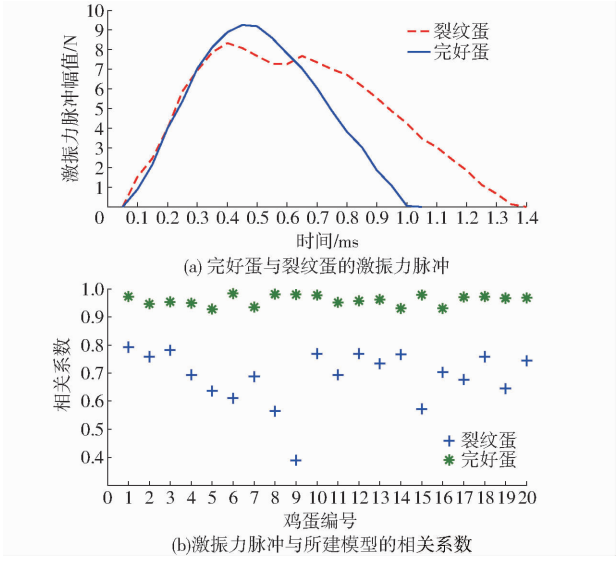


图 8　激振力脉冲的差异性与稳定性

Fig. 8　Difference and stability of impact pulse

5　结论

（1）设计了一套瞬态冲击反作用力实时采集装置，通过对敲击装置进行力学分析，结果表明：激励棒所能产生的激振力脉冲宽度与激励棒质量呈正相关、与棒头刚度呈负相关；激振力脉冲峰值与棒头刚度系数、激励棒质量和敲击速度均呈正相关。

（2）通过试验建立了冲击所产生激振力脉冲宽度与激励棒质量、棒头材质之间的关系，优化选择了能够有效提高频带的尼龙作为棒头材料，激励棒质量需要小于 5.6 g；并建立了冲击产生的激振力脉冲峰值与冲击速度之间的关系式，可为后期在不同检测对象和环境下的敲击速度选择提供指导。

（3）通过对冲击过程的机理研究，建立了激励棒对禽蛋瞬态冲击过程中的激振力脉冲函数表达

式,为后续禽蛋裂纹检测过程中的有限元分析和响应信号分析提供了理论基础。

(4)试验结果表明,完好蛋和裂纹蛋的激振力脉冲存在明显差异;优化后敲击装置对完好蛋的激振力脉冲具有较好的一致性和稳定性,与所建数学模型的相关系数均在 0.92 以上。

参 考 文 献

1 潘磊庆, 屠康, 刘明,等. 基于声学响应和 BP 神经网络检测鸡蛋裂纹[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(6):115 - 118.
PAN Leiqing,TU Kang, LIU Ming, et al. Eggshell crack detection based on acoustic response and BP neural network[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2010,33(6):115 - 118. (in Chinese)

2 王巧华, 邓小炎, 文友先. 鸡蛋敲击响应的奇异性特征与蛋壳裂纹多层检测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12):127 - 131.
WANG Qiaohua,DENG Xiaoyan,WEN Youxian. Egg-shell crack multi-level detection based on the singularity feature of dynamic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12):127 - 131. (in Chinese)

3 姜瑞涉,王俊, 陆秋君,等. 鸡蛋敲击响应特性与蛋壳裂纹检测[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3):75 - 78.
JIANG Ruishe, WANG Jun, LU Qiujun, et al. Eggshell crack detection by frequency analysis of dynamic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3):75 - 78. (in Chinese)

4 刘俭英, 陈家焱, 丁幼春,等. 蛋壳破损自动检测模型研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9):114 - 118.
LIU Jianying, CHEN Jiayan, DING Youchun, et al. Model for automatic detection of eggshell crack[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9):114 - 118. (in Chinese)

5 CHO H K, CHOI W K, PAEK J H. Detection of surface cracks in shell eggs by acoustic impulse method [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6):1921 - 1926.

6 平建峰, 吴坚, 应义斌. 基于短时傅立叶变换的鸡蛋破损检测技术的研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(7):1055 - 1060.
PING Jianfeng,WU Jian,YING Yibin. Detection of egg cracks by short-time Fourier transform[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2009,22(7):1055 - 1060. (in Chinese)

7 YANG J, PAN H, PENG Z W, et al. Based on vibration and improved GRNN identify eggshell crack[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 472:404 - 408.

8 陆秋君, 王俊, 于慧春,等. 蛋壳裂纹的神经网络判别[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009, 30(5):454 - 458.
LU Qiujun, WANG Jun, YU Huichun, et al. Identification of eggshell crack using BPNN and GA - BPNN in dynamic frequency analysis[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(5):454 - 458. (in Chinese)

9 孙力, 蔡健荣, 林颢,等. 基于声学特性的禽蛋裂纹实时在线检测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5):183 - 186.
SUN Li, CAI Jianrong, LIN Hao, et al. On-line detection of cracked shell eggs based on acoustic resonance analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):183 - 186. (in Chinese)

10 LIN H, ZHAO J W, CHEN Q S, et al. Eggshell crack detection based on acoustic impulse response and supervised pattern recognition[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2009, 27(6):393 - 402.

11 LI S, BI X K, HAO L, et al. On-line detection of eggshell crack based on acoustic resonance analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1):240 - 245.

12 KETELAERE B D, COUCKE P, BAERDEMAEKER J D. Eggshell crack detection based on acoustic resonance frequency analysis[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(2):157 - 163.

13 蔡健荣, 赵杰文, 邹小波,等. 基于声学特性的禽蛋裂纹快速在线无损检测装置及方法:CN101413928B[P]. 2011 - 11 - 16.
CAI Jianrong,ZHAO Jiewen,ZOU Xiaobo,et al. Rapid online non-destructive detection apparatus and method of cracked shell eggs based on acoustic resonance analysis: CN101413928B[P]. 2011 - 11 - 16. (in Chinese)

14 王剑平, 王海军, 应义斌,等. 禽蛋在线裂纹检测敲击方法及装置:CN103018343B[P]. 2014 - 09 - 17.
WANG Jianping,WANG Haijun, YING Yibin, et al. The method and apparatus of eggs online crack detection: CN103018343B[P]. 2014 - 09 - 17. (in Chinese)

15 梅劲华, 王石泉, 王树才. 禽蛋破损在线检测自动敲击发声装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):334 - 338.
MEI Jinhua,WANG Shiquan, WANG Shucai. Design and experiment of automatic knocking device for eggshell crack detection [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9):334 - 338. (in Chinese)

16 SUN L, ZHANG S Q, CAI J R, et al. The application of DSP in eggshell quality online detection system[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 43:68 - 71.

17 刘俭英, 田茂胜, 王巧华,等. 基于 DSP 的鸡蛋破损检测分级装置设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12):125 - 128.
LIU Jianying, TIAN Maosheng, WANG Qiaohua, et al. Design on testing and grading device of cracked egg based on DSP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12):125 - 128. (in Chinese)

18 王育桥. 鸡蛋外壳静力学特性有限元分析及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6):107 - 111.
WANG Yuqiao. Research and finite element analysis of static characteristic of eggshell [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 107 - 111. (in Chinese)

19 宋慧芝, 王俊, 叶均安. 鸡蛋蛋壳受载特性的有限元研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2006, 32(3):350 - 354.
SONG Huizhi,WANG Jun, YE Jun'an. Analysis of the loading properties of fowl eggshell with finite element method[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2006, 32(3):350 - 354. (in Chinese)

20 KEMPS B, KETELAERE B D, BAMELIS F, et al. Development of a methodology for the calculation of Young's modulus of eggshell using vibration measurements[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2):215 - 221.

21 PERIANU C, KETELAERE B D, PLUYMERS B, et al. Finite element approach for simulating the dynamic mechanical behaviour of a chicken egg[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(1):79 - 85.

22 崔志平. 鸡蛋静载特性分析及有限元研究[D]. 镇江:江苏大学, 2009.
CUI Zhiping. Static properties and finite element analysis of chicken eggs[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2009. (in Chinese)