

基于振动信号分析仪的冲击试验数据采集方法研究

仲晨¹, 安宏申¹, 齐藤胜彦²

(1. 曲阜师范大学, 日照 276826; 2. 神户大学, 神户 658-0022)

摘要: **目的** 探寻利用振动信号分析仪采集冲击试验数据的方法,并验证新方法数据的可信度。**方法** 首先,从力学模型、数据采集理论及信号处理原理等3方面入手,分析振动试验与冲击试验数据采集的异同点,为新方法提供思路及理论支持。其次,以OROS动态信号分析仪为具体研究对象,以常规冲击试验数据采集仪Shock Manager为对比仪器进行验证性冲击试验,进而提出基于OROS动态信号分析仪的冲击试验数据采集方法及具体参数设定。最后,对比实验结果并进行误差分析以验证新方法的可行性。**结果** 利用OROS动态信号分析仪采集的冲击波形与常规冲击试验数据采集仪所得数据比较可知,表征冲击响应波形的三大要素(最大加速度、作用时间及速度变化)的吻合度均很高。**结论** 将通常用于振动试验的动态信号分析仪进行冲击试验数据采集的思路是切实可行的。

关键词: 数据采集; 冲击; 振动; 信号处理; 包装测试

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)23-0027-06

Data Acquisition Method of Shock Test Using Vibration Signal Analyzer

ZHONG Chen¹, AN Hong-shen¹, SAITO Kastuhiko²

(1. Qufu Normal University, Rizhao 276826, China; 2. Kobe University, Kobe 658-0022, Japan)

ABSTRACT: **Objective** To seek a data acquisition method of the shock test using a vibration signal analyzer, and to verify the feasibility of the new method. **Methods** First, the similarities and differences between the data acquisition of the shock and vibration tests were compared by considering mechanical model, data acquisition theory and signal process, which provided ideas and theoretical support for the new method. Second, using OROS dynamic signal analyzer and conventional data collection instrument—Shock manager, a confirmatory shock test was carried out, furthermore, a new data collection method of shock test using vibration signal analyzer was proposed and the parameter setup conditions were confirmed. Finally, using the experimental results, error analysis was conducted to verify the feasibility and reliability of the new method. **Results** By comparing the experimental results measured through OROS dynamic signal analyzer and Shock manager, the three factors of the response pulses of the shock test were highly matched. **Conclusion** It was proved that the vibration signal analyzer could be used to acquire the experimental data of the shock test.

KEY WORDS: data acquisition; shock test; vibration; signal processing; packaging test

包装的主要目的之一是保护内装产品在流通过程中免受各种有害因素的影响,而包装件受到典型的机械有害因素是冲击及振动,因此,冲击试验和振动试验是包装件缓冲性能测试中不可或缺的核心试验^[1-3]。该两试验的数据采集方法直接影响实验结果,对此已有许多研究。薛飞、张伟^[4]研究了自由跌落冲

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 曲阜师范大学科研启动基金

作者简介: 仲晨(1979—),男,山东济宁人,工学博士,曲阜师范大学讲师,主要研究方向为运输包装、包装仿真、包装结构设计。

击过程中数据采集与处理的相关问题。周海^[5]将一款多功能数据采集卡 PCI-1712 应用于冲击试验。武振昕等^[6]进行了对机械振动信号采集方法的研究,提出了基于 TMS320F2812 采集系统的设计开发方案。不难看出,冲击试验和振动试验的最终实验数据虽均为加速度-时间曲线,但传统的数据采集方法多采用不同的数据采集仪器(分别为冲击数据测试仪和振动信号分析仪),这无疑在很大程度上增加了测试成本。

若能在数据采集时做到一机多用,则无疑会受到企业及科研单位的欢迎。文中尝试探索利用振动信号分析仪进行冲击试验的数据采集方法,旨在为冲击试验的数据采集提供新思路,同时降低测试成本,提高振动信号分析仪的利用率。

1 可行性分析

1.1 两试验的力学模型

典型包装件常被简化为图 1a 所示的质量块-弹簧-衰减器力学模型^[7-8]。无论冲击试验还是振动试验,均可假设力学模型开始处于静止状态,当其底部突然受到某一外力 F 后产生运动,不同之处在于 F 是瞬时外力还是持续外力^[9]。若包装系统被施加瞬时外力(这里假设为半正弦波),则力学模型处于冲击模式;若被施加连续外力(这里假设为正弦波),则力学模型处于振动模式。图 1b 两曲线是力学模型在其他条件相同,仅外力不同(实线表示系统被施加半正弦波的瞬时外力,虚线表示系统被施加正弦波的持续外力)的条件下,其响应加速度-时间曲线。换言之,图 1b 是系统在冲击模式及振动模式下的响应曲线。由图 1b 可知,在冲击模式下,由于外力是瞬时力且会衰减,所以加速度随时间逐渐变为 0;在振动模式下,由于系统受到外力的持续激励,所以响应曲线将最终趋于稳态振动。对比两曲线可知,冲击模式可视为振动模式在时间域的瞬时状态。

1.2 数据采集理论

对于冲击试验和振动试验,两者的试验方法、试验目的不尽相同,但目前 2 种试验常用的数据采集方法却是一致的^[10-13],即均基于触发式采集理论(见图 2)^[14]。该理论具体内容为:首先,数据采集仪开始工

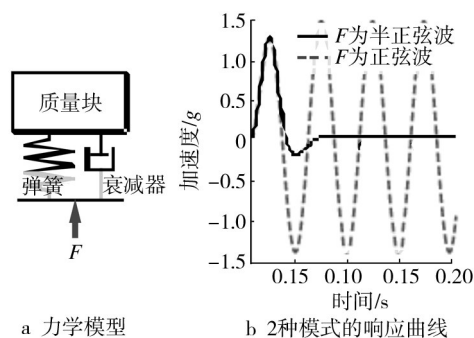


图1 冲击试验和振动试验的力学模型与理论响应曲线

Fig.1 Mechanical model and theoretical response curves of the shock and vibration tests

作,不断接收来自传感器的信号;其次,试验设备(振动试验机或冲击试验机)开始动作,当冲击或振动产生时,由传感器采集的信号达到触发条件,形成数据记录事件,此时数据采集系统开始记录数据;最后,达到设定记录时间后数据采集仪停止记录,数据采集过程完成。

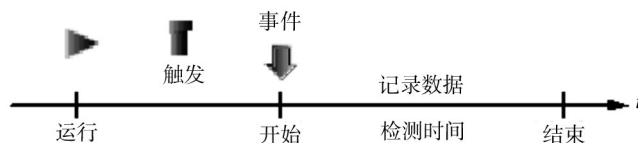


图2 触发式数据采集理论

Fig.2 Triggered data acquisition theory

1.3 信号处理原理

通过实验测得的信号是一种原始数据,若不加处理是无法用于科学分析的。目前的信号处理技术已由原来的模拟信号处理转变为数字信号处理(Digital Signal Procession, DSP)。该处理方式具有便于计算机处理、精度及可靠性高等优点^[15]。

DSP 处理见图 3。首先将加速度传感器固定于测控对象的合适位置并开始试验,传感器获得测控对象的模拟信号;而后为便于进行科学地分析与处理,从中提取尽可能反映试验特性与传播规律的有用信息,经模/数(A/D)转换后须将信号进行离散化处理,使之转变为离散信号;最后再经数/模(D/A)转换后将其变为计算机可识别的数字信号,完成信号的采集与处理^[16]。

信号的离散化处理是 DSP 处理中的重要一环,振动试验的信号离散化处理见图 4^[17]。首先将某一时间

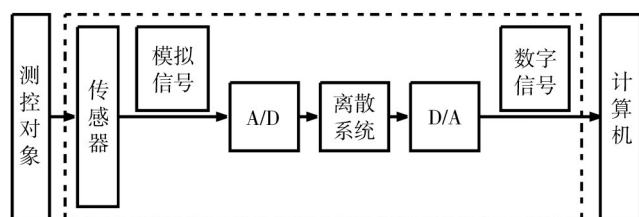


图3 数字信号处理示意

Fig.3 Diagram of digital signal processing

段的模拟信号(见图4a)读入,然后按某特定采样间隔将时间域及数据域分别离散化(见图4b),通过坐标系中纵横方向的网格与模拟信号函数的交叉点便将信号函数进行了离散(见图4c)。

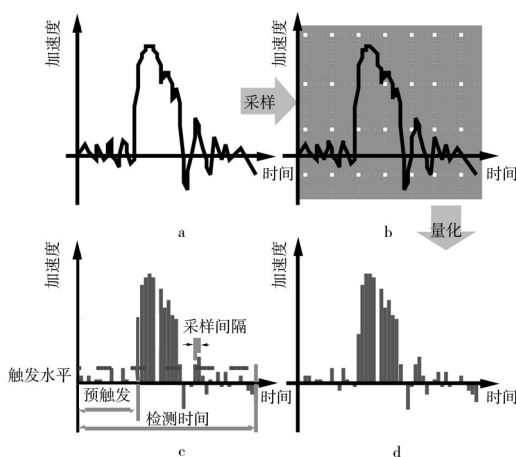


图4 信号离散化处理示意

Fig.4 Diagram of data discretization

能否正确真实地测量冲击试验或振动试验数据,试验信号的离散化参数设定至关重要。这些参数见图4d,具体描述为^[18]:加速度检测范围(单位:g),定义了测试仪器本身可检测的最大加速度或由用户自定义的数据采集最大值(一般设定原则为预测最大加速度为此数值的70%~90%);采样间隔(单位:s),通过A/D转换时进行时间离散化时的时间间隔,此值越小,则采样精度越高;检测时间(单位:s),进行数据采集及记录的时间长度。对于某些检测仪器,并不直接要求设定检测时间,而是需要输入采样数,其关系为检测时间=采样间隔×采样数;触发水平(单位:%),采集系统开始记录采集数据的阈值,通常以加速度检测范围的百分比表示,小于此参数的加速度数据会被采集仪忽略,只有大于此参数的加速度数据才会被记录;预触发(单位:%),该参数表征了触发水平对应加速度

所处时刻之前的时间段,一般以检测时间的百分比表示,该参数决定了记录波形在坐标系中的横坐标(即时间轴)位置。

综上所述,冲击试验与振动试验不论从力学模型的受力分析、数据采集理论,还是信号处理过程来分析,两者的本质均相同,不同的仅是数据采集时间与最大加速度大小。可见,利用通常用于测量振动试验数据的振动信号分析仪来检测冲击试验数据的思路在理论上是可行的。

2 实验

2.1 材料及仪器设备

2.1.1 材料

实验材料:发泡聚乙烯(发泡倍率为25倍,尺寸为180 mm×180 mm×40 mm),日本旭化成株式会社;载荷铁块(材料为不锈钢,质量为3 kg,尺寸为220 mm×220 mm×10 mm),自制。

2.1.2 仪器设备

实验仪器设备:OROS OR34动态信号采集仪,法国OROS公司;Shock Manager冲击数据采集仪,日本神荣科技株式会社;冲击试验机,ASQ-700,日本神荣科技株式会社。

OROS OR34动态信号采集仪是该研究的核心研究对象。通常,该仪器用于振动测试、声学测试、结构分析、或旋转机械等应用领域,由数据采集分析硬件(4通道OR34信号分析仪,以下简称OR34)、数据采集分析软件(NVGate平台)、三轴加速度传感器(精度为24 bit,频率响应为0.5~40 kHz,量程为100 g)及配套电脑组成(见图5)。



图5 OROS OR34动态信号采集系统

Fig.5 OROS OR34 dynamic signal analyzer

Shock Manager 冲击数据采集仪用于采集原始实验数据后作为数据对比的标准。该采集仪是测量冲击试验数据的常规仪器,包括 Shock Manager 本体 SMH-12(以下简称 SMH-12)、加速度传感器(精度为 16 bit,频率响应为 1~3000 Hz,量程为 500 g)、SR 数据采集软件及配套电脑。

2.2 设备连接

为了测试的准确性及简便性,文中以模型化的载荷铁块-缓冲材料单元作为被检测对象。首先,将被检测对象放置于冲击台正中央并固定,以防止试验过程中的回跳现象。其次,分别将连接 OR34 和 SMH-12 的加速度感应器并列粘附于载荷铁块的上面中心位置,以采集冲击发生时传递到铁块上的加速度信号。最后,将 OR34 和 SMH-12 分别与其专用电脑相连,以使用 NVGate 和 SR 软件进行数据采集。验证性冲击试验的硬件连接见图 6。

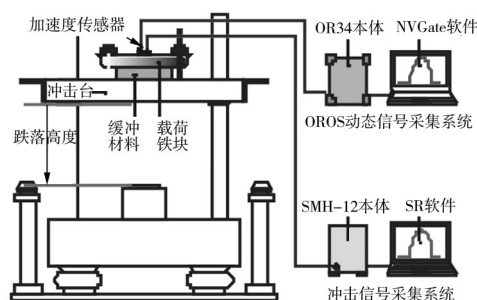


图6 验证性冲击试验的硬件连接示意

Fig.6 Hardware connection in the confirmatory shock test

2.3 步骤

- 1) 按 2.2 中描述连接硬件。
- 2) 将冲击试验机的冲击台上升到要求的跌落高度;在 NVGate 及 SR 中设定相关参数,为记录实验数据做准备。
- 3) 点击 NVGate 及 SR 中的「运行」按钮,采集系统将会处于等待触发阶段,以便在满足触发条件后进行实验数据的实时记录。
- 4) 操作者移至冲击试验机控制台,按下控制台上的“落下”按钮,使冲击台落下完成冲击试验。
- 5) 在冲击发生瞬间,OR34 和 SMH-12 2 个信号采集系统中的触发条件被激活,NVGate 及 SR 记录试验数据并在电脑屏幕上显示实验图形。

- 6) 更换新的发泡聚乙烯缓冲材料,重复步骤 1) — 5),进行 10 次重复试验,并记录实验数据。

2.4 参数设定

2.4.1 SR 的参数设定

作为数据对比的依据,SR 中的参数均设定为一般情况下具有代表性参数。跌落高度为 60 cm,采样数为 500,采样间隔为 50 μ s(检测实际为采样数 500 $\times$ 50 μ s=25 ms),触发水平为 1.2%,低通滤波器为 300 Hz,预触发为 15%。

2.4.2 NVGate 的参数设定

OR34 应用领域广泛,NVGate 作为数据采集分析软件平台备有多种模块,几乎全部集成于“Analyzer Setting Brower”面板中。如数据记录与回放、实时/离线 FFT 分析、同步阶次跟踪分析、时域数据处理分析等^[21]。面对如此多的功能模块,如何选择与取舍,如何进行对应的参数设置是该研究的关键。

大部分的 DSP 运算可分为信号分析和信号滤波两类。信号分析涉及信号特性的测量,它通常是一个频域的运算;信号滤波的特征是“信号输入-信号输出”,它通常作时域运算^[16]。对于包装测试领域中的振动试验及冲击试验来说,最重要的实验数据是加速度-时间信号。此类信号采集属于信号滤波处理,而信号滤波处理只会用到诸如数据记录回放、滤波器设置等模块,而不会用到诸如 FFT 分析、同步阶次跟踪等功能。

基于上述分析,经反复预实验的尝试发现,对于该研究,NVGate 中 5 个模块的设定是必不可少的(见图 7):Front-end,用以定义采样间隔及接驳传感器类型、技术参数;Recorder,用以定义检测时间;Filter builder,用以定义低通滤波器数据;Event definition,用以定义触发水平及预触发;Monitor,用以显示数据采集图形窗口。

为使实验数据具有可对比性,这里的采样间隔、检测时间、低通滤波器、触发水平及预触发参数设置均与 2.4.1 中 SR 参数一致。

2.5 结果

对于每次冲击试验,OR34 及 SMH-12 会分别记录冲击响应加速度-时间曲线。10 次重复实验结果汇总见表 1。为便于误差分析,将两仪器测得的最大加速

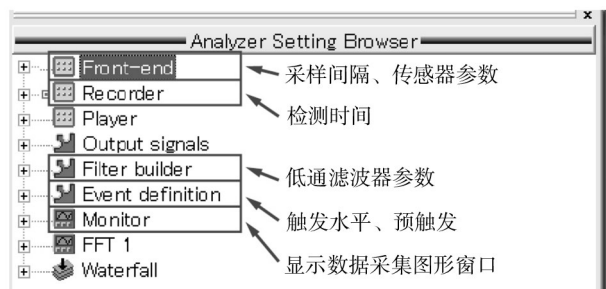


图7 OROS OR34中的模块选择
Fig.7 Module selection in OROS OR34

表1 基于OR34及SMH-12的最大加速度与作用时间

Tab.1 The peak acceleration and duration measured by OR34 and SMH-12

序号	最大加速度/g		作用时间/ms	
	SMH-12	OR34	SMH-12	OR34
1	91.2	90.5	3.70	3.80
2	89.7	90.4	3.71	3.82
3	92.3	91.5	3.70	3.75
4	88.2	89.0	3.75	3.70
5	91.5	91.2	3.80	3.83
6	89.7	91.4	3.70	3.85
7	90.4	89.8	3.75	3.79
8	87.8	88.2	3.69	3.74
9	91.4	90.6	3.71	3.65
10	90.7	88.9	3.73	3.75

度与作用时间分别归纳为一组。

需要指出的是,表1中OR34的作业时间参数并不能由NVGate直接读出,而是由后处理计算得出。

3 结果对比

首先进行定性分析。两仪器所得数据的曲线见图8(这里以表1中序号1的实验结果为例,为比较方便,将SMH-12测得曲线沿横坐标方向做了适当偏移以匹配OR34所得曲线),对于加速度-时间曲线来说,最重要的要素是最大加速度、作用时间和速度变化(曲线与横坐标所围面积)。由图8可知,两曲线的三因素匹配程度均很高。

为定量分析OR34所带来的测量误差,分别对最大加速度及作用时间进行单因素方差分析,这里显著性水平(即95 %可信度)。最大加速度及作用时间的分析结果分别见表2—3,可知两仪器测得的最大加速

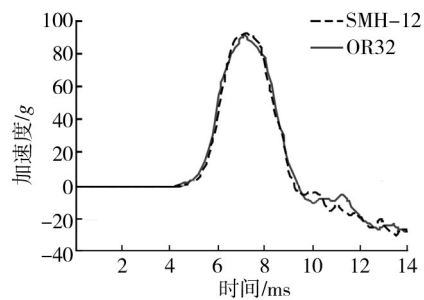


图8 OR34及SMH-12测得冲击响应加速度-时间曲线
Fig.8 Comparison between response acceleration-time curves measured by OROS and SMH-12

表2 最大加速度的单因素方差分析

Tab.2 ANOVA of the peak acceleration

SUMMARY						
组	观测数	求和	平均	方差		
SMH-12	10	902.9	90.29	2.112		
OR34	10	901.5	90.15	1.300		
方差分析						
差异源	离差平方和	自由度	均方差	F值	P值	F临界值
组间	0.10	1	0.10	0.06	0.81	4.41
组内	30.70	18	1.71			
总计	30.70	19				

表3 作用时间的单因素方差分析

Tab.3 ANOVA of the duration

SUMMARY						
组	观测数	求和	平均	方差		
SMH-12	10	37.24	3.72	0.001		
OR34	10	37.68	3.77	0.004		
方差分析						
差异源	离差平方和	自由度	均方差	F值	P值	F临界值
组间	0.10	1	0.010	3.85	0.065	4.41
组内	0.05	18	0.003			
总计	0.05	19				

度的方差之比、作用时间的方差之比均不超过4,故最大加速度及作用时间这2组数据均可视为同方差。由此,方差分析中得到的P值分别为0.81,0.06,均大于显著性水平0.05,因此应接受零假设,可以认为不同检测仪器对最大加速度及作用时间均无显著影响。换句话说,由OR34收集的冲击试验数据在可信范围内,该仪器可用于冲击试验数据采集作业。

4 结语

首先从理论上分析将振动信号分析仪用于冲击试验数据采集的可行性,进而利用 OROS OR34 信号分析仪进行对比试验,最后对实验结果分别进行定性及定量分析。分析表明 OR34 信号分析仪与常规冲击试验数据采集系统所得数据吻合度很高,在可信范围之内。故通过合理的参数设定,振动信号分析仪完全可用于冲击试验数据采集。

必须指出的是传统冲击试验数据采集仪一般可进行冲击谱(SRS)分析,而 OR34 并不具备这一功能,但通过与许多一线包装设计人员交流得知,实际生产中冲击谱分析功能的使用频率并不高,原因在于对于冲击试验,最具实际意义的数据是最大加速度与作用时间,故此可认为 OR34 在冲击谱分析上的不足并不影响它在冲击测试中的应用。另外,针对不同厂家的振动信号分析仪,其参数设定与文中描述可能不尽相同,但文中重在探索振动信号分析仪用于冲击试验时进行参数设定的可行性,同时为软件内部的模块选择与取舍、参数具体数值的确定等提供了思路,因此具有很强的参考价值。

参考文献:

- [1] 彭国勋,郭彦峰,舒祖菊,等. 物流运输包装设计(第2版)[M]. 北京:印刷工业出版社,2012.
PENG Guo-xun, GUO Yan-feng, SHU Zu-ju, et al. Packaging Design of Logistical Transportation Package (2nd Edition)[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [2] 郭彦峰,徐文才,李小丽,等. 包装测试技术(第2版)[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
GUO Yan-feng, XU Wen-cai, LI Xiao-li, et al. Packaging Testing Technology (2nd Edition)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [3] 赵庆海,陈文燕. 存储测试技术在运输包装测试应用中的问题探讨[J]. 包装工程, 2003, 24(1): 77—78.
ZHAO Qing-hai, CHEN Wen-yan. Exploration and Discussion of Memorized Test and Measurement Technology Applied to the Test of Transport Packaging[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1): 77—78.
- [4] 薛飞,张炜. 跌落冲击试验机的控制和数据采集处理系统[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 54—59.
XUE Fei, ZHANG Wei. Control and Data Acquisition Processing System of Drop Impact Testing Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 54—59.
- [5] 周海. PCI-1712 数据采集卡在冲击试验机上的应用[J]. 试验技术与试验机, 2007(1): 64—66.
ZHOU Hai. The Application of PCI-1712 Data Acquisition Card in Impact Testing Machine[J]. Test Technology and Testing Machine, 2007(1): 64—66.
- [6] 武振昕,敖银辉,曹斌. 基于 TMS320 F2812 振动信号采集系统的设计与开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(9): 85—91.
WU Zhen-xin, AO Yin-hui, CAO Bin. Design and Development of Vibration Signal Acquisition System Based on TM-SI20F2812[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(9): 85—91.
- [7] CYRIL M H, ALLAN G P. Harris' Shock and Vibration Handbook (5th Edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [8] ZHONG Chen, SAITO K, KAWAGUCHI K, et al. The Hybrid Drop Test[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27(7): 509—520.
- [9] YAM K L. Encyclopedia of Packaging Technology[M]. New Jersey: A John Wiley & Sons Inc, 2009.
- [10] 李志强. 包装冲击试验机专用虚拟仪器设计[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 70—72.
LI Zhi-qiang. Design of Virtual Instrument Used in Package Impact Testing Machine[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 70—72.
- [11] 孔振,李辉,曹雪峰. 减振密封包装箱设计及试验分析[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 128—131.
KONG Zhen, LI Hui, CAO Xue-feng. Design and Experimental Analysis of Damping and Sealing Packing Box[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 128—131.
- [12] LU Fei, ISHIKAWA Y, KITAZAWA H, et al. Effect of Vehicle Speed on Shock and Vibration Levels in Truck Transport[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(2): 101—109.
- [13] VANE C, SHER P, JAY J, et al. Measurement and Analysis of Truck and Rail Vibration Levels in Thailand[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(2): 91—100.
- [14] 邹婧邵,于正林. 液压冲击试验台控制与数据采集方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 44—46.
ZOU Xu-shao, YU Zheng-lin. LabWindows/CVI Based Control and Data Acquisition System of the Hydraulic Shocking Platform[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33(3): 44—46.

(下转第 57 页)

- and Commercial Products[M]. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002:251—274.
- [11] LEE J K, LEE K H, JIN B S. Structure Development and Biodegradability of Uniaxially Stretched Poly (L-lactide)[J]. European Polymer Journal, 2001, 37:907—914.
- [12] GRUBER P R, KOLSTAD J J, RYAN C M, et al. Melt-stable Amorphous Lactide Polymer Film and Process for Manufacturing Thereof:US,5484881[P]. 1996.
- [13] OU X, CAKMAK M. X-ray Studies of Structural Development during Sequential and Simultaneous Biaxial of Polylactic Acid Film[C]// ANTEC. 2003, 2003:1701—1705.
- [14] 翁云宣. 聚乳酸合成、生产、加工及应用研究综述[J]. 塑料工业, 2007, 35(6):69—73.
- WENG Yun-xuan. Review of Study of Synthesis, Production, Process and Application of PLA[J]. China Plastics Industry, 2007, 35(6):69—73.
- [15] ANDERSON K S, LIM S H, HILLMYER M A. Toughening of Polylactide by Melt Blending with Linear Low-density Polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 89:3757—3768.
- [16] KULINSKI Z, PIORKOWSKA E. Crystallization, Structure and Properties of Plasticized Poly (l-lactide) [J]. Polymer, 2005, 46:10290—10300.
- [17] NIJENHUIS A J, COLSTEE E, GRIJPMAN D W, et al. High Molecular Weight Poly(l-lactide) and Poly(Ethylene Oxide) Blends: Thermal Characterization and Physical Properties[J]. Polymer, 1996, 37:5849—5857.
- [18] SONG Y, WANG D, WANG X, et al. A Method for Simultaneously Improving the Flame Retardancy and Toughness of PLA [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22 (12) : 2295—2301.
- [19] HASSOUNA F, RAQUEZ J, ADDIEGO F, et al. New Approach on the Development of Plasticized Polylactide (PLA): Grafting of Poly(Ethylene Glycol) (PEG) via Reactive Extrusion[J]. European Polymer Journal, 2011, 47:2134—2144.
- [20] PIORKOWSKA E, KULINSKI Z, GALESKI A, et al. Plasticization of Semicrystalline Poly (L-lactide) with Poly (Propylene Glycol)[J]. Polymer, 2006, 47:7178—7188.
- [21] BAIARDO M, FRISONI G, SCANDOLA M, et al. Thermal and Mechanical Properties of Plasticized Poly(L-lactic Acid) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90: 1731—1738.
- [22] LJUNGBERG N, WESSLEN B. Tributyl Citrate Oligomers as Plasticizers for Poly (Lactic Acid) : Thermo-mechanical Film Properties and Aging[J]. Polymer, 2003, 44(25):7679—7688.
- [23] SHIBATA M, INOUE Y, MIYOSHI M. Mechanical Properties, Morphology, and Crystallization Behavior of Blends of Poly (l-lactide) with Poly (Butylene Succinate-co-l-lactate) and Poly (Butylene Succinate)[J]. Polymer, 2006, 47:3557—3564.
- [24] JIANG L, WOLCOTT M P, ZHANG J. Study of Biodegradable Polylactide/Poly (Butylene Adipate-co-terephthalate) Blends [J]. Biomacromolecules, 2006, 7:199—207.
- [25] KAI W, ZHAO L, ZHU B, et al. Enforcing Effect of Double-fullerene End-capped Poly (Ethylene Oxide) on Mechanical Properties of Poly (L-lactic Acid) [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2006, 27:109—113.
- [26] KAI W, ZHAO L, ZHU B, et al. Mechanical Properties of Blends of Double-fullerene End-capped Poly (Ethylene Oxide) and Poly (L-lactic Acid) [J]. Macromolecular Chemistry Physics, 2006, 207(8):746—754.
- [27] DONG T G, JIN Y, GUO X, et al. Improving the Toughness of Poly (L-lactic Acid) by Interpenetrating Network Structure[J]. Advanced Materials Research, 2011, 239—242:1919—1922.

(上接第32页)

- Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(3):44—46.
- [15] 朱冰莲, 方敏. 数字信号处理(第2版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2014.
- ZHU Bing-lian, FANG Min. Digital Signal Processing (2nd Edition)[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2014.
- [16] 何子述, 夏威, 程婷, 等. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- HE Zi-shu, XIA Wei, CHENG Ting, et al. Modern Digital Signal Processing and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [17] 丁微波, 耿靓, 范瑾. 包装测试数据采集问题刍议[J]. 包装工程, 2010, 31(13):54—59.
- DING Wei-bo, GENG Liang, FAN Jin. Discussion on Issues of Data Acquisition of Packing Test[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13):54—59.
- [18] SAITO K, HASEGAWA K. Foundation and Applications of Transport Package[M]. Tokyo:Saiwaishobo, 2008.
- [19] Introduction of OROS [DB/OL] (2014-10-01).http://www.oros.com/3889-multi-channel-analyzers.html.