

# 高速摄影技术在跌落加速度测试中的应用研究

邱发平<sup>1</sup>, 向红<sup>2</sup>, 何景风<sup>3</sup>, 赵德坚<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 2. 华南农业大学, 广东 广州 510642; 3. 总后勤部军需装备研究所, 北京 100010)

**摘要:** 以垂直冲击试验机为测试平台, 对采用高速摄影机测试跌落冲击加速度的方法进行了初步研究; 通过将分析结果与加速度传感器测试值进行对比, 分析了高速摄影机测试精度及其影响因素。

**关键词:** 高速摄影技术; 跌落冲击; 加速度测试

中图分类号: TB487

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2010)02-0036-04

## Application of High-Speed Imaging Technology in Acceleration Test

Qiu Faping<sup>1</sup>, Xiang Hong<sup>2</sup>, He Jingfeng<sup>3</sup>, Zhao Dejian<sup>1</sup>

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. Materiel Research Institute of the General Logistics Department, Beijing 100010, China)

**Abstract:** A new method of using high-speed camera in acceleration test of packaging drop and analysis is introduced. Through comparing with the test results of acceleration sensor, the test principal and main influencing factor was particularly analyzed.

**Key words:** high-speed imaging technology; packaging drop test; acceleration test

## 0 引言

近年来, 高速摄影技术的发展十分迅速, 这使得它在农业、军事、航空、汽车、工程、体育及生物等领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。如借助运动图像分析软件(如 Image pro plus、TEMA、MIAS 等), 可以对选定的目标进行轨迹追踪和测量, 测量结果包括坐标位置、速度、加速度、角度、角速度、角加速度、移动距离等多组数据。

跌落实验是用于评价包装对内装物保护能力的重要测试项目, 产品所能承受的最大加速度(脆值)是缓冲包装设计的主要参数, 准确测量产品跌落冲击

时的加速度, 确定易损部件及破损程度, 对包装设计具有十分重要的意义<sup>[3-4]</sup>。传统的加速度传感器测试技术具有方便、准确的特点, 但是当产品(或易损部件)质量较小或者传感器不好固定时, 采用传统的测试方式可能无法完成测试任务, 并且难以得到不同特征点之间的相对变形量, 更无法对数据进行深加工(如应力分析等)。高速摄影技术正好弥补了这一遗憾, 且能清楚地记录冲击变形过程, 并得到加速度等动力学数据, 为产品结构优化与包装设计提供最直观有效的参考。然而, 高速摄影技术在包装设计中的应用还少有文献报道, 测试技术、测量精度及影响因素也还有待研究。

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 湖南工业大学创新基金资助项目(CX0807), 广东省高等学校人才引进专项基金资助项目(2008017), 中国人民解放军总后勤部军需装备研究所项目(2009136)

作者简介: 邱发平(1982-), 男, 福建龙岩人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为包装防护原理与技术,

E-mail: enjoyfafa@qq.com

向红(1964-), 男, 湖南安化人, 华南农业大学教授, 主要从事运输包装, 食品包装方面的教学与研究。

本文在不同测试条件下, 采用高速摄影技术, 测量了冲击实验机平台的加速度, 并与加速度传感器的测量结果进行了对比, 对影响高速摄影测量精度的因素进行了分析。

## 1 高速摄影技术基本原理与误差分析

图像运动分析技术是摄影测量技术与图像处理技术交叉而产生的一门边缘科学技术。该技术通过对序列图像中特定目标的位置进行标识、跟踪、分析, 得到特定目标的变形、位移、速度和加速度等运动参数, 从而实现目标的定性分析和定量测量。图像运动分析技术的主要步骤为: 序列图像的采集与存储→数字化序列图像中目标标识与跟踪→目标运动分析→结果输出。

目标标识主要通过关键位置贴上识别标志来实现, 通过贴在目标附近的标尺, 可将图片中的单位像素转换成实际的长度单位。通过图像解析的方法可得出标识点的位移, 根据插值原理可建立该点的位置-时间关系曲线, 通过一次数值微分, 可得到目标点的速度-时间曲线, 通过二次数值微分, 可求出其加速度-时间曲线。

高速摄影技术中, 用于速度与加速度测试分析时的误差来源于多个因素, 如图像分辨率大小、像素坐标采集误差、图像采集频率、设备与操作误差等。图像分辨率太小引进的误差, 会造成像素坐标采集误差变大, 所以像素坐标采集误差及采样频率是影响测量精度的主要原因<sup>[6]</sup>。

设  $t_i$  时刻采集到的图像上某点的坐标为  $x_i, y_i$ , 2 个处理间隔的时间为  $\Delta t_i$ ,  $\lambda$  为实物尺寸与对应图像尺寸的比, 则  $x$  方向的速度分量可表示为:

$$v_{x_i} = \lambda \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \lambda \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{\Delta t_i}, \quad (1)$$

则  $x$  方向的速度分量误差可表示为:

$$\delta v_{x_i} = \delta \lambda \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{\Delta t_i} + \lambda \frac{(x_{i+1} - x_{i-1}) \delta \Delta t_i}{\Delta t_i^2} + \lambda \frac{\delta x_{i+1} - \delta x_{i-1}}{\Delta t_i}, \quad (2)$$

由于  $\lambda$  比较大, 故  $\delta \lambda$  可忽略不计; 且当拍摄达到稳定时, 时间间隔波动也很小, 即  $\delta \Delta t_i$  也可忽略。所以式 (2) 变为<sup>[6]</sup>:

$$\delta v_{x_i} = \lambda \frac{\delta x_{i+1} - \delta x_{i-1}}{\Delta t_i} = \frac{\sqrt{2} \lambda \delta x_i}{\Delta t_i}, \quad (3)$$

由式 (1) 和 (3) 可得:

$$\frac{\delta v_{x_i}}{v_{x_i}} = \frac{\sqrt{2} \delta x_i}{x_{i+1} - x_{i-1}}, \quad (4)$$

同样可得:

$$\frac{\delta v_{y_i}}{v_{y_i}} = \frac{\sqrt{2} \delta y_i}{y_{i+1} - y_{i-1}}. \quad (5)$$

同样的处理可得加速度测量误差表达式为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\delta a_{x_i}}{a_{x_i}} = \frac{\sqrt{6} \delta x_i}{x_{i+2} + x_{i-2} - 2x_i}, \quad (6)$$

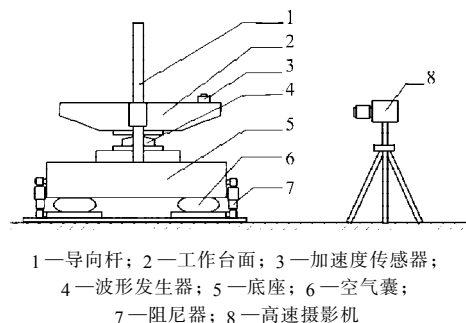
$$\frac{\delta a_{y_i}}{a_{y_i}} = \frac{\sqrt{6} \delta y_i}{y_{i+2} + y_{i-2} - 2y_i}. \quad (7)$$

由式 (4) ~ (7) 可以看出, 如果图像分辨率和像素坐标采集误差一定, 那么当处理时间间隔取得过小时, 速度与加速度相对误差的分母也会很小, 则像素坐标采集误差会被放大, 特别是加速度计算的相对误差会产生急剧的放大效果, 所以采样时间间隔不宜取得太小。

同样地, 当采样频率一定时, 速度与加速度的相对误差主要受像素坐标采集误差的影响, 故应尽可能地提高图像的分辨率, 或尽可能地使分析对象充满画面, 以最大限度地减小误差。

## 2 实验装置与测试准备

本文主要采用 Y52100-2/ZF 型 100 kg 垂直冲击试验台和日本 PHOTRON 公司生产的 FASTCAM Ultima APX 高速摄影机进行实验研究, 实验装置如图 1 所示。



1—导向杆; 2—工作台面; 3—加速度传感器;  
4—波形发生器; 5—底座; 6—空气囊;  
7—阻尼器; 8—高速摄影机

图 1 主要设备示意图

Fig. 1 The testing system

图 1 所示实验设备中的 APX 高速摄影机在 1 024 × 1 024 分辨率下可以达到 2 000 fps 的拍摄速度, 此摄影机的最高拍摄速度可达 120 000 fps, 图 1 中压电加速度传感器灵敏度为 2.14 pC/(m · s<sup>-2</sup>), 且误差小于 ± 5%。测试采用正弦冲击波形, 波形发生器 1 的冲击时间相对较长, 冲击加速度相对较小; 波形发生器 2 的冲击时间相对较短, 冲击加速度相对较大。实验及图像采集完成后, 用 TEMA 图像分析软件来进行数据采集与图像分析。

为了对比高速摄影与加速度传感器测试结果, 将

加速度传感器安装在冲击试验台的工作台边上。由于工作台面没有明显的标识点,所以应在正对摄影机的工作台面上贴上标尺和编码标志,如图2所示。

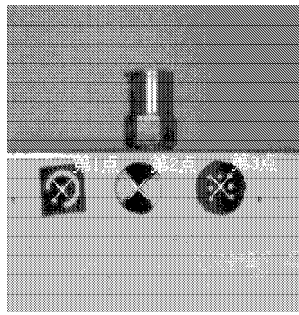


图2 标尺和编码标志

Fig. 2 The ruler and coding sign

在保证能够拍摄到完整跌落过程的情况下,应尽量使相机接近拍摄目标,这样能更清楚地拍摄到目标物的结

构和变形情况。根据信号采样原理,在采样过程中合理确定采样间隔和采样长度,是保证采样得到的数字信号能够真实反映原信号的基本条件,而且采样频率要大于奈奎斯特采样频率。冲击机工作时的冲击时间为几毫秒到几百毫秒不等,根据已有文献资料,拍摄频率一般要在2 000 fps以上<sup>[5]</sup>。但采集频率也不是越大越好,摄影机镜头的通光率会随着拍摄频率的增加而降低,图片分辨率和亮度也会随之降低,图片的清晰度变差。同时,拍摄频率越高,数据处理量急增,受高频干扰信号的影响也越大,从而影响了数据的准确性。笔者通过多次实测,决定本研究中采用4 000 fps的拍摄频率。

### 3 加速度测试影响因素分析

测量仪器的精度、图片清晰度、分辨率、测量条件的波动性等都会影响测量的准确性。当连续2幅序列图像目标点的测量间距比较大时,在精度要求不高的场合下,可以不考虑误差的影响。当拍摄速度较高、而目标点运动速度较小时,由于测量间距变小,测量误差将对测量结果,尤其是加速度值,产生较大的影响。分析表明,拍摄时比例值取得较大,所以比例尺误差基本可以忽略不计;同样,当拍摄频率达到稳定时,时间间隔的波动也很小,亦可以忽略不计;所以,速度和加速度的误差主要来源于目标点坐标的输入误差<sup>[6]</sup>。以下对可能影响加速度测试精度的几个因素进行分析。

#### 3.1 不同编码标志对测试误差的影响

设置编码标志的目的是识别目标和追踪目标的运动状态,本实验设置了如图2所示的3种编码标志,通过高速摄影机采集的一组序列图像,得到的3个标志上的加速度-时间曲线如图3所示。

分析图3数据可得,3个标志上的最大加速度值误差不得超过2%,可见,不同的编码标志对测量结果并没有显著的影响。

1— 4 000 fps/ 第1点 [time/y] Max: 558.90 m/s<sup>2</sup>  
2— 4 000 fps/ 第2点 [time/y] Max: 557.69 m/s<sup>2</sup>  
3— 4 000 fps/ 第3点 [time/y] Max: 549.83 m/s<sup>2</sup>

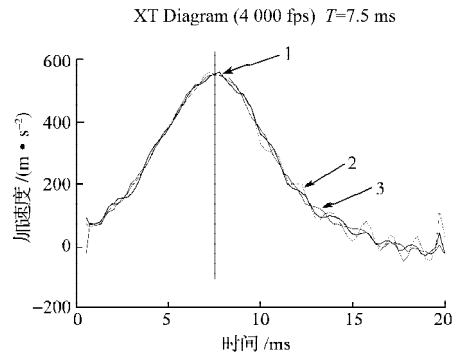


图3 不同标志点的加速度时间曲线

Fig. 3 Accelerations in different points

#### 3.2 不同跌落高度对测试值的影响

采用波形发生器1,摄影机的位置固定在0.55 m处,采样频率为4 000 fps,图像分辨率为512 × 512,改变跌落高度,所测得的结果如表1所示。由表1可知,随着跌落高度的增加,冲击时间会缓慢减小,最大加速度值显著增加;高速摄影机测得的加速度值比加速度传感器的测试值要大,相对误差有所减小,最后稳定在5%左右。

表1 目标点在不同跌落高度的测试结果

Table 1 The test results in different dropping heights

等效跌落高度 /mm	冲击时间 /ms	最大加速度 / (m·s <sup>-2</sup> )		绝对误差 / (m·s <sup>-2</sup> )	相对误差 /%
		加速度传感器	高速摄影机		
167	18.2	234	261	26	11.20
246	17.1	321	355	33	10.38
343	15.8	419	458	39	9.39
437	14.7	527	568	41	7.78
556	13.5	639	681	42	6.58
613	12.0	761	800	39	5.18
701	11.3	881	926	45	5.11
780	10.5	991	1 044	52	5.25
863	9.6	1 123	1 181	58	5.16

误差原因是由于跌落高度较小时,冲击时间较长,而最大加速度值较小。此时,在采样频率不变的情况下,连续2幅序列图像目标点的测量间距变小,测量误差随之变大。而当跌落高度增加时,情况正好相反。所以,在冲击时间较长、加速度峰值较小时,应该适当降低采样频率。

#### 3.3 图像分辨率对测试值的影响

采用波形发生器2,保持冲击台上面上升高度不变(每次等效跌落高度略有变化,对实验结果不会产生太大的误差),改变摄影机的距离,测得数据如表2所示。

表2 不同拍摄距离的测量值

Table 2 The test results in different shooting distances

拍摄距离 /m	比例尺 /(mm·pixel <sup>-1</sup> )	冲击时间 /ms	等效跌落高度 /mm	最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> )		绝对 误差 /(m·s <sup>-2</sup> )	相对误差 /%
				加速度传感器	高速摄影机		
0.55	0.145 985	8.3	419	712	736	24	3.35
0.80	0.225 080	8.3	418	712	737	25	3.51
1.00	0.275 591	8.3	416	714	739	25	3.52
1.20	0.361 446	8.3	417	718	754	36	5.02
1.50	0.445 434	8.3	415	714	756	43	5.97
2.00	0.524 934	8.3	417	717	771	54	7.58

由表2可以看出,当拍摄距离在1 m以内时,由于图像分辨率没有太大的变化,所以距离对测试精度并没有显著的影响;但当拍摄距离在1.2 m以上时,由于标志点太小而使个别较小编码元消失,从而精确度有所降低。可见,图像分辨率对测试结果的影响是比较显著的。

#### 4 结论

本文以垂直冲击机为实验平台,采用高速摄影机对冲击平台跌落时的加速度进行了测试与分析。研究表明,测试误差除了仪器本身的精度处,主要来源于像素坐标采集误差和连续序列图像目标点之间的测量间距,故当图像分辨率较低和清晰度不佳、或采样频率过高时,误差会比较大。所以应尽可能地提高图像的分辨率,或尽可能地使分析对象充满画面,以最大限度地减小坐标采集误差;当运动速度较小而冲击时间较长时,应该适当降低采样频率,以保证连续2幅序列图像目标点之间的测量间距不会太小。

研究表明,只要选择了合适的采样频率与分辨率,高速摄影技术用于测量产品的跌落加速度是完全可行的,随着设备分辨率与精度的进一步提高及应用软件的发展,可以预见高速摄影技术在包装设计中的应用会越来越多。

#### 参考文献:

[1] 廖小翠,郭学彬. 断药导爆管传爆过程的高速摄影试验研

究[J]. 爆破, 2009(1): 89-91.

Liao Xiaocui, Guo Xuebin. Experiment Study of High-Speed Photography on Detonation Propagating of Explosive Faults Nonel[J]. Blasting, 2009(1): 89-91.

[2] Karayel D, Wieschoff M, Zmerzi A, et al. Laboratory Measurement of Seed Drill Seed Spacing and Velocity of Fall of Seeds Using High-Speed Camera System[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.

[3] 宋宝锋. 产品脆值理论与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.

Song Baofeng. Product Fragility Theory and Application[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 2002.

[4] GB/T 4857.5-92, 包装运输包装件跌落试验方法[S]. GB/T 4857.5-92, Packaging — Transport Packages — Vertical Impact Test Method by Dropping[S].

[5] 袁中文. 故障信号采样长度、时间间隔和频率的关系[J]. 设备管理与维修, 2002(1): 31.

Yuan Zhongwen. Relationship between Sampling Length of Fault Signal, Time Interval and Frequency[J]. Plant Maintenance Engineering, 2002(1): 31.

[6] 蒋恩臣, 蒋亦元, 刘道顺. 高速摄影拍摄频率与判读的误差分析[J]. 东北农业大学学报, 2002, 31(4): 381-384.

Jiang Enchen, Jiang Yiyuan, Liu Daoshun. Studies on Surveying Error and Photo Frequency of Ultra-Speed Cinematography[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2002, 31(4): 381-384.

(责任编辑: 廖友媛)