

## 两种便携式冲击记录仪测量精度对比

仲晨<sup>1</sup>, 朱丽<sup>1</sup>, 赵冬菁<sup>1</sup>, 王丽丽<sup>1</sup>, 崔庆斌<sup>2</sup>, 黄昌海<sup>3</sup>

(1. 曲阜师范大学, 日照 276800; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093;

3. 沃时派客包装科技有限公司, 上海 200051)

**摘要:** **目的** 通过对比试验, 明确简易型冲击记录仪(鲸货物保镖)相比精密型路谱仪(SAVER)在数据测量上的精度差异。**方法** 首先研究基于跌落冲击状态下包装件跌落高度的计算理论。其次制作试验包装件进行实验室自由跌落试验, 利用鲸货物保镖与 SAVER 进行试验数据的测量。再次进行数据分析, 获取鲸货物保镖加速度峰值与跌落高度的关系, 以及对 SAVER 而言包装材料的恢复系数。最后进行实际运输试验, 分别基于 2 种仪器数据进行跌落高度计算, 进而分析简易型冲击记录仪数据测量精度的可靠性。**结果** 跌落高度分析表明, 基于鲸货物保镖的跌落高度低于基于 SAVER 数据, 处于数据分析的危险侧; 鲸货物保镖数据出现“扎堆”现象, 说明该仪器的采集精度欠佳。可靠性分析表明, 2 种仪器在累计概率 90% 以上的跌落高度几乎相同; 2 种设备所计算的跌落高度在大于 20 cm 时, 其累计概率均接近 100%。**结论** 虽然鲸货物保镖所测数据单一, 数据精度较精密型仪器有差距, 但其数据转换为跌落高度具有可靠性, 可用于运输包装设计。

**关键词:** 冲击记录仪; 路谱仪; 精度; 跌落高度; 大数据

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0129-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.021

## Comparison of Measurement Precision of Two Portable Shock Recorders

ZHONG Chen<sup>1</sup>, ZHU Li<sup>1</sup>, ZHAO Dong-jing<sup>1</sup>, WANG Li-li<sup>1</sup>, CUI Qing-bin<sup>2</sup>, HUANG Chang-hai<sup>3</sup>

(1. Qufu Normal University, Rizhao 276800, China; 2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China;

3. Worthpack Technology Co., Ltd., Shanghai 200051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to clarify the precision difference between Cargo Bodyguard (a lite-performance shock recorder) and SAVER (a high-performance road spectrometer) on data measurement through comparative tests. Firstly, the calculation theories of the package drop height based on the drop shock state were studied. Secondly, a testing package was designed for the free fall tests in laboratory. The experimental data were measured by Cargo Bodyguard and SAVER, respectively. Thirdly, data analyses were conducted to determine the relationship between peak acceleration and drop height for Cargo Bodyguard and the restitution coefficient of packaging materials for SAVER. Finally, an actual transportation test was carried out. The drop heights were calculated respectively based on the two instruments and thus the reliability of the data measurement accuracy of the lite-performance shock recorder was analyzed. The drop height analysis indicated that, the drop heights based on Cargo Bodyguard were lower than those based on SAVER, and the former was in the dangerous zone of data analysis. Moreover, data of Cargo Bodyguard showed a “data-gather” issue that meant collecting precision of such instrument was not admirable. The reliability analysis showed that the two instruments had almost the same drop height when the cumulative probability was bigger than 90%. In addition, the cumulative probabilities were nearly 100% when the drop height calculated by two kinds of equipment was greater than 20 cm. Although the data measured by Cargo Bodyguard are monotonous and the data precision is different from the high-performance instruments, the drop height converted from Cargo Bodyguard is reliable, and can be used in the transportation packaging design.

**KEY WORDS:** shock recorder; environment recorder; precision; drop height; big data

收稿日期: 2018-06-08

基金项目: 2017 年度山东省自然科学基金 (ZR201702100113); 2016 年度山东省高等学校科技计划 (J16LA15)

作者简介: 仲晨 (1979—), 男, 博士, 曲阜师范大学副教授, 主要研究方向为运输包装、包装结构设计。

如何设计更为经济高效的运输包装一直是包装领域经久不衰的课题,运输包装设计目前普遍遵循缓冲包装设计“六步法”<sup>[1]</sup>。按六步法设计原则,进行运输包装设计的首要任务便是明确运输包装件所经历的物流环境,以便为后期设计提供参考数据,力求使流通过程中产生的有害因素传递到内装物的能量减至最小。包装件在流通过程中一般经历运输、装卸、搬运、仓储等环节。在这些环节中因客观或人为因素包装件会受到振动、冲击等有害因素影响。其中,冲击和跌落是造成商品直接破损的2个重要因素。跌落高度直观地描述了商品在受到冲击跌落时的能量大小,是衡量商品经受冲击大小的关键参数<sup>[2]</sup>。跌落高度可由多种方式得知,如直接观测法、相机观测法、仪器跟踪法,但最有效的方法莫过于仪器跟踪法,这种方法主要使用路谱仪或冲击记录仪。这类设备均内置有加速度和温、湿度传感器,分别用以测量流通环节商品受到的冲击或振动加速度及物流环境温湿度数据,它们在包装和物流领域多有应用。如李昀<sup>[3]</sup>、丁勇等<sup>[4]</sup>、毕中臣等<sup>[5]</sup>、贺志等<sup>[6]</sup>利用美国 Lansmont 公司的路谱仪 SAVER<sup>®</sup>,分别研究了家电运输包装设计、现代包装物流技术及典型路谱的模拟运输振动试验方法。仲晨等<sup>[7]</sup>利用日本神荣株式会社的 DER-1000<sup>®</sup>调查了国内快递物流环境的振动情况。国外学者则普遍利用 SAVER 进行相关研究,如多位学者对美国<sup>[8-9]</sup>、匈牙利<sup>[10]</sup>、日本<sup>[11]</sup>、印度<sup>[12]</sup>、巴西<sup>[13]</sup>、泰国<sup>[14]</sup>等国家物流环境进行了深入调查。

在上述研究应用中,如 SAVER<sup>[15]</sup>、DER-1000<sup>[16]</sup>都能够精确测量包装件在运输环境中的冲击、振动数据,属于精密型路谱仪,但普遍价格昂贵。在大数据时代的今天,智能包装和智能物流是社会发展的趋势之一,目前动辄十几万元的路谱数据采集设备不利于这一趋势的实现。针对这一问题,仅千元价位的简易型冲击记录仪受到业界青睐。它们一般价格便宜、机身小巧,也可以便捷地实现对货物的振动、冲击等数据的实时监测,但简易型冲击记录仪因价格优势带来的不足便是性能上的局限性,同时其数据可靠性也易遭到质疑。为此,文中以鲸货物保镖<sup>®</sup>这一简易型冲击记录仪为例,通过实验室试验和实际运输试验,与精密型路谱仪 SAVER 进行对比,研究简易型冲击记录仪所测数据的可靠性。

## 1 跌落高度的计算方法

根据路谱仪或冲击记录仪种类的不同,有些可直接提供跌落高度数据,有些则不具备此功能,但不论何种品牌,由于仪器内置的动力学传感器为加速度传感器,跌落高度须经计算得知。目前的跌落高度计算理论有自由落体分析法和恢复系数分析法<sup>[17]</sup>。

### 1.1 自由落体分析法

自由落体法计算跌落高度示意图1。理论上,包装件跌落过程可视为从垂直高度  $h$  处由静止状态自由落体后冲击到刚性冲击面上,随后反弹。这一过程对应的加速度-时间曲线见图1。若忽略一切阻力,则包装件在自由落体阶段的加速度是  $1g$ 。设自由落体持续时间为  $t$ ,则冲击刚发生时包装件的冲击速度  $v$  可由式(1)得到。

$$v = \int_{t_1}^{t_2} g dt = gt \quad (1)$$

式中: $g$ 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $t_1$ ,  $t_2$ 分别为自由落体开始及结束时间。

根据机械能守恒定律,初始状态的势能全部转换为冲击瞬时的动能,则有  $mgh=m(gt)^2/2$ ,式(1)变形后见式(2)。

$$h = \frac{1}{2} gt^2 \quad (2)$$

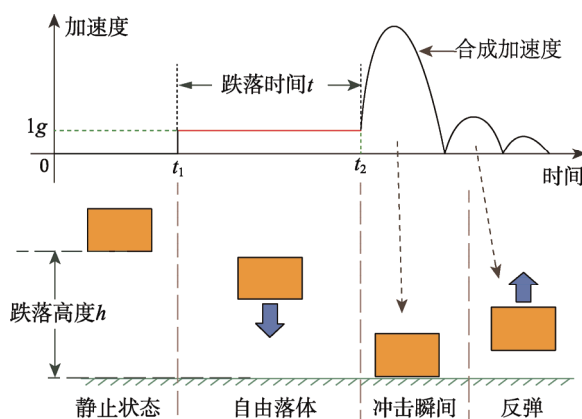


图1 自由落体法计算跌落高度示意

Fig.1 Diagram of calculating method of  $h$  based on the free fall

理论上,若  $t$  可由路谱仪或冲击记录仪等仪器测得,则包装件的跌落高度可由式(2)简单地求出。

### 1.2 恢复系数分析法

自由落体分析法基于包装件在跌落过程处于自由落体状态这一假设前提,但显然,包装件的实际跌落现象并不总满足这一前提。如野蛮抛掷同样会产生冲击加速度,而此时包装件却处于水平跌落状态。可见该方法计算的是“理想”跌落高度,该跌落高度包含理论误差,故而越来越多的学者倾向于恢复系数分析法,该方法示意图2,为了便于理解,图2中的质量块-弹簧模型代表包装件。恢复系数  $e$  被定义为包装件离地瞬时速度  $v_2$  与触地瞬时速度  $v_1$  比值的绝对值,它表征了缓冲材料在经历冲击后的恢复能力。该理论假设忽略一切阻力,包装件由跌落高度  $h$  处落下,在跌落冲击发生瞬间包装件具有触地瞬时速度  $v_1$ ,由机械能守恒可知,  $v_1$  可由式(3)表示。

$$v_1 = \sqrt{2gh}$$
(3)

在经过缓冲材料压缩变形后包装件将再次离地，由恢复系数定义可知，此时离地瞬时速度  $v_2 = ev_1$ 。根据包装动力学知冲击加速度-时间曲线为近似半正弦波，该波形与横坐标所围面积为速度变化量  $\Delta v$ ，且有  $\Delta v = v_1 + v_2$ ，则  $\Delta v$  可由式（4）表示。

$$\Delta v = (1+e)\sqrt{2gh}$$
(4)

式（4）变形得式（5）。基于式（5）及材料恢复系数  $e$  与速度变化量  $\Delta v$ ，则可计算跌落高度。

$$h = \frac{1}{2g} \left( \frac{\Delta v}{1+e} \right)^2$$
(5)

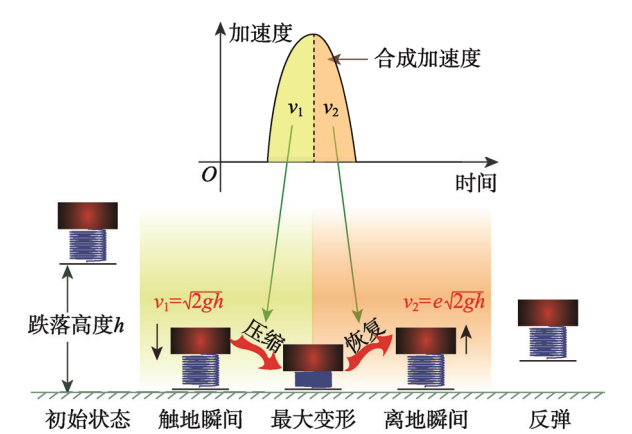


图 2 恢复系数法计算跌落高度

Fig.2 Diagram of calculating method of  $h$  based on the restitution coefficient

2 试验仪器简介

文中使用的冲击记录仪为简易型鲸货物保镖（座头鲸信息技术有限公司，标准版 ZG-C-4000D），对比设备为精密型路谱仪 SAVER（美国 Lansmont 公司，3X90）。2 种设备见图 3，相关参数对比见表 1。

由表 1 可知，作为简易型冲击记录仪的鲸货物保镖较精密型路谱仪 SAVER 而言，其最大优势在于低廉的价格。相比 SAVER 十几万人民币的价格，鲸货物保镖仅需千元即可入手。价格优势同时导致了性能上的不足。相比 SAVER，鲸货物保镖的劣势表现为：前者可记录加速度的时间序列，而后者仅可记录加速度峰值点；前者数据分析功能强大（如跌落高度计算），而后者仅可采集原始数据；前者的信号采样率可在每个通道每秒 50 至 5000 数据点自适应，而后者固定为每个通道每秒 1000 数据点，采样带宽窄于前者。

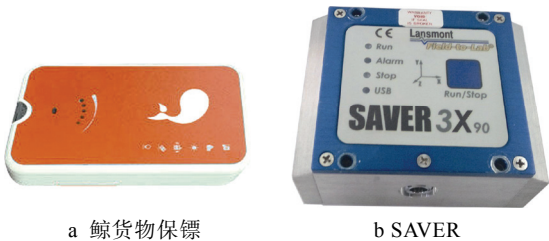


图 3 2 种试验仪器

Fig.3 Two test instruments

表 1 鲸货物保镖与 SAVER 的参数对比

Tab.1 The parameters comparison between Cargo Bodyguard® and SAVER®

| 参数    | 尺寸/mm       | 质量/kg | 所测数据     | 每个通道<br>每秒采样数 | 数据存储  | 分析<br>功能 | 温度/<br>℃ | 相对湿<br>度/% | 价格水平/<br>元 |
|-------|-------------|-------|----------|---------------|-------|----------|----------|------------|------------|
| 鲸货物保镖 | 100×60×14.4 | 0.115 | 加速度峰值    | 1000          | 仅云端   | 无        | -30~+60, | 0~95       | 千元价位       |
| SAVER | 127×124×43  | 1     | 加速度-时间曲线 | 50~5000       | 本机或云端 | 强        | 0~+60,   | 0~95       | 十万元价位      |

由于鲸货物保镖仅能测量包装件受到的冲击或振动加速度峰值点，无法记录如自由落体时间  $t$  或速度变化量  $\Delta v$ ，故无法直接使用自由落体分析法或恢复系数分析法计算跌落高度，因此，文中研究了针对简易型冲击记录仪的冲击跌落计算方法。首先，根据运输包装件特点设计试验包装件，将鲸货物保镖固定其中。其次，利用自由跌落试验机对试验包装件进行自由跌落试验。试验时预设一系列跌落高度，每一跌落高度用鲸货物保镖记录其冲击加速度峰值。最后，对数据进行曲线拟合，得到冲击加速度  $G$  与跌落高度  $h$  的关系曲线。具体的试验步骤描述如下所述。

3 实验室试验

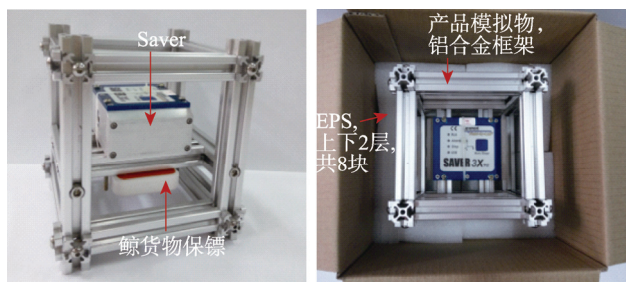
3.1 试验包装件

典型的运输包装件一般有内装产品、缓冲衬垫、

外包装箱 3 部分组成，文中按此结构设计试验包装件。其中，外包装箱为 0201 纸箱（B 瓦楞纸板，厂家：日本联合株式会社青岛工厂，500 g/m<sup>2</sup>）；缓冲衬垫采用 EPE 角垫（板厚：30 mm，尺寸：110 mm×110 mm×110 mm，发泡倍数：25 倍）；为确保数据采集的准确性，内装产品模拟物是由 X 型铝合金条材组装而成的金属框架（尺寸：110 mm×110 mm×110 mm，厚度：20 mm，质量：3 kg）。在铝合金框架的中间位置设计有横梁，用以将鲸货物保镖与 SAVER 一上一下固定在其上，使整个包装件重心基本处于中心位置。试验包装件实物见图 4。

3.2 自由跌落试验

使用自由跌落试验机（深圳莱伯通试验设备有限公司，DT200），对上述试验包装件进行自由跌落试验。试验目的有 2 个：对鲸货物保镖而言，获得跌落



a 内装产品模拟物

b 包装件

图 4 试验包装件

Fig.4 Testing package

高度  $h$  与冲击加速度  $G$  间的相关关系, 从而可基于式 (2) 计算跌落高度; 对 SAVER 而言, 获取缓冲材料恢复系数  $e$ , 以便利用式 (5) 计算跌落高度。

2 种试验仪器参数设置分述如下。鲸货物保镖: 加速度量程为 16g, 续航时间 15 d, 信号采样率设为每个通道每秒 1000 采样。SAVER: 触发模式设置为时间触发占 23%, 信号触发占 77%; 加速度量程设为 20g; 记录频率为 3 min/次; 帧长度设置为 1024。

根据 GB/T 2423.8<sup>[18]</sup> 进行自由跌落试验, 跌落方式为面跌落, 跌落高度依次设为 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 cm。每一跌落高度进行 5 次连续性试验, 仅在跌落高度改变时更换新的缓冲垫和外部瓦楞纸箱。由鲸货物保镖和 SAVER 各自记录同一试验的冲击加速度数据。

### 3.3 试验结果与分析

根据自由跌落试验结果, 通过数据分析, 分别确定 2 种仪器的跌落高度计算用参数。

#### 3.3.1 鲸货物保镖

将鲸货物保镖测得的冲击加速度峰值进行数据整理, 得各设定跌落高度下对应的冲击加速度峰值平均和标准偏差见表 2。

对表 2 中第 1 列数据  $h$  及第 2 列数据  $G$  进行曲线拟合, 得拟合方程见式 (6), 其相关关系曲线见图 5。

表 2 基于鲸货物保镖的加速度峰值  $G_{\max}$   
Tab.2 The  $G_{\max}$  values based on Cargo Bodyguard

| 跌落高度<br>$h/\text{cm}$ | 加速度峰值 $G_{\max}$ 平均值<br>(g) | 标准偏差<br>(g) |
|-----------------------|-----------------------------|-------------|
| 30                    | 3.19                        | 9.93        |
| 35                    | 8.97                        | 7.09        |
| 40                    | 9.91                        | 6.06        |
| 45                    | 9.99                        | 5.19        |
| 50                    | 10.56                       | 3.11        |
| 55                    | 12.00                       | 6.14        |
| 60                    | 15.22                       | 5.60        |
| 65                    | 16.36                       | 3.08        |
| 70                    | 16.61                       | 2.67        |
| 75                    | 19.12                       | 3.77        |

由式 (6) 变形得式 (7)。利用式 (7), 若已知冲击加速度  $G$ , 则可计算出对应的跌落高度  $h$ 。

$$G=0.0747 \times h^{1.2834} \quad (6)$$

$$h=(13G)^{-1.2834} \quad (7)$$

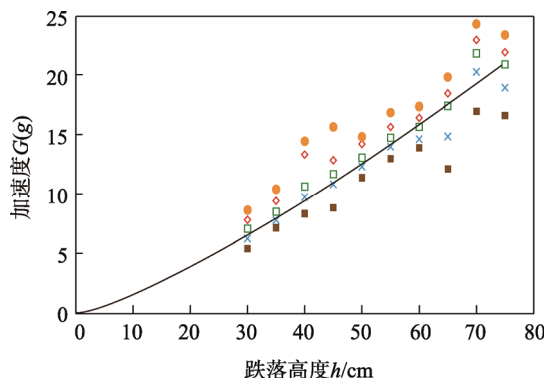


图 5 峰值加速度-跌落高度曲线 (底面跌落)

Fig.5 Peak acceleration-drop height curve (bottom drop)

#### 3.3.2 SAVER

根据包装动力学可知, 恢复系数  $e$  是反映冲击时物体变形恢复能力的参数, 它只与冲击物体的材料有关。实际碰撞冲击多为弹性碰撞, 故实际材料的  $e$  值范围为  $0 < e < 1$ 。

由式 (5) 变形可得到式 (8)。根据式 (8) 可知, 若已知包装件的跌落高度及速度变化量, 则可以计算出缓冲材料的  $e$  值。根据 SAVER 测得的速度变化量  $\Delta v$  的平均值及所设置的跌落高度  $h$ ,  $e$  值汇总见表 3。

$$e = \left| \frac{\Delta v}{\sqrt{2gh}} - 1 \right| \quad (8)$$

表 3 基于 SAVER 的恢复系数  $e$   
Tab.3 The  $e$  values based on SAVER

| 跌落高度<br>$h/\text{cm}$ | 速度变化量 $\Delta v$ 平均值/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 恢复系数<br>$e$ |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------|-------------|
| 30                    | 1.03                                                        | 0.58        |
| 35                    | 1.09                                                        | 0.59        |
| 40                    | 1.07                                                        | 0.62        |
| 45                    | 1.11                                                        | 0.63        |
| 50                    | 1.15                                                        | 0.63        |
| 55                    | 1.18                                                        | 0.64        |
| 60                    | 1.22                                                        | 0.64        |
| 65                    | 1.23                                                        | 0.66        |
| 70                    | 1.22                                                        | 0.67        |
| 75                    | 1.19                                                        | 0.69        |
| 平均值                   | 1.15                                                        | 0.63        |

由表 3 得试验包装件缓冲材料的恢复系数  $e=0.63$ , 进而可根据式 (5) 计算基于 SAVER 数据的包装件跌落高度  $h$ 。

## 4 实际运输试验

为验证基于实验室数据转换跌落高度方法的可靠性,进一步进行了实际运输试验。

### 4.1 试验包装件及试验方法

实际运输试验使用和实验室试验同样设计的试验包装件,在单程运输开始前及结束后均替换新角垫和外瓦楞纸箱,鲸货物保镖和 SAVER 的参数设置亦同自由跌落试验。为了便于监控包装件经历的物流路线,在包装件内增加了 GPS 定位仪。

试验包装件由天天快递寄出,试验路线选定为日照—上海往返路线。由 GPS 定位仪数据知试验包装件实际行走路线以高速公路为主(约占总路程的 95%),但在始点和终点也有少量一级、二级、三级不同路况公路<sup>[19]</sup>。试验时间为 2017 年 7 月 25 号至 2017 年 7 月 31 号。

### 4.2 数据分析与对比

基于前述确定的 2 种仪器的跌落高度计算参数及实际运输试验数据,从跌落高度计算和累计概率 2 个方面综合对比了鲸货物保镖与 SAVER 的测量精度差异。

#### 4.2.1 跌落高度对比

首先分别利用式(2)和式(5)计算鲸货物保镖与 SAVER 对应的跌落高度。考虑到 2 种仪器在数据采集过程中会同时采集振动和冲击加速度,故首先对原始数据进行分析处理。根据前期研究<sup>[7]</sup>,这里以跌落高度 6 cm 作为数据处理阈值,低于该跌落高度阈值的加速度按振动加速度对待,在数据处理时这部分数据不予保留。数据处理结果汇总见图 6,由于实际物流测试中因货物中转等因素造成的数据采集停滞期,数据并非连续。

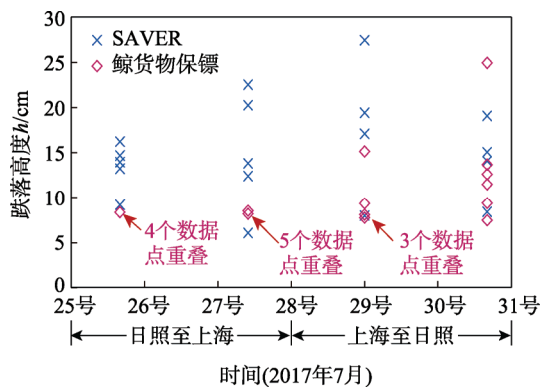


图 6 跌落高度分析

Fig.6 Analysis of the drop height

从图 6 可以看出,同一时间段内,基于 SAVER 的跌落高度显著高于基于鲸货物保镖计算的跌落高度,这种差异最大达 1 倍。若以精密型 SAVER 数据

作为对比标准,可知鲸货物保镖得出的跌落高度处于数据分析的危险区。故以鲸货物保镖进行包装设计时应增大安全系数以弥补数据采集精度不足带来的误差。鲸货物保镖在多个时间段测得的数据表现出“扎堆”现象。经 GPS 定位分析,知这些数据集中时间均在货物中转环节,跌落冲击加速度应因装卸搬运所致,其跌落应表现出 SAVER 所测的上下浮动数据。说明鲸货物保镖无法精确捕捉冲击加速度数值,在测量精度上尚有不足。

#### 4.2.2 可靠性分析

鉴于鲸货物保镖计算的跌落高度较精密型 SAVER 有较大差异,对计算跌落高度的可靠性做了进一步分析。Weibull 分布<sup>[20]</sup>在可靠性工程中具有广泛的适用性,而指数分布是其特殊情况,也很好符合正态分布及其他分布。跌落高度的计算可靠性很好地符合 Weibull 分布,其分布函数见式(9)。

$$W(h) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (9)$$

式中:  $W(h)$  为跌落高度的累计概率百分比;  $\alpha$  为形状参数;  $\beta$  为尺度参数。对式(9)进行变形可得式(10)。

$$h = \beta \{-\ln[1 - W(h)]\}^{1/\alpha} \quad (10)$$

首先对计算所得跌落高度进行线性回归分析,计线性回归方程的斜率为  $k$ , 截距为  $b$ , 则以  $k$  作为 Weibull 分布的形状参数  $\alpha$ , 以  $\exp(-b/k)$  作为尺度参数  $\beta$ 。最后利用中值法(Medium rank)得到  $h$  与  $W(h)$  的关系式,从而通过累计概率  $W(h)$  判断跌落高度计算方法的可靠性。基于鲸货物保镖和 SAVER 的累计概率分别见式(11)和式(12),相应曲线对比见图 7。

$$h = 15.4107 \left\{ -\ln \left[ 1 - W(h)^{\frac{1}{2.0766}} \right] \right\} \quad (11)$$

$$h = 19.9556 \left\{ -\ln \left[ 1 - W(h)^{\frac{1}{2.2505}} \right] \right\} \quad (12)$$

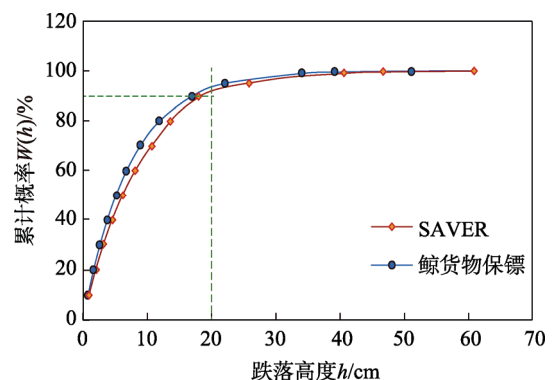


图 7 2 种仪器的累计重合率对比

Fig.7 Comparison of cumulative coincidence rate of two instruments

由图 7 横向对比可知, 2 种仪器在累计概率 90% 以上的跌落高度几乎相同。在进行包装设计时, 通常选择累计概率 90% 以上作为置信区间, 故可知鲸货物保镖用于运输包装设计时, 基于该仪器计算的跌落高度具有可靠性。纵向对比可知, 2 种仪器所计算跌落高度在大于 20 cm 时累计概率趋于 100%, 可视为数据可靠性相同。根据前期研究<sup>[7]</sup>表明, 国内公路物流环境的跌落高度多在 15 ~ 100 cm 之间, 可见 2 种仪器在这一区间内测量数据具有同等可信度。

## 5 结语

通过实验室试验和实际快递运输试验, 以精密型路谱仪 SAVER 作为对比标准, 研究了价位低廉的简易型冲击记录仪—鲸货物保镖的冲击数据测量精度, 并提出了针对简易型冲击记录仪的跌落高度计算方法。

随着国内包装行业和物流业的快速发展, 智能包装、大数据物流成为发展新趋势。像鲸货物保镖这样价位低廉的数据采集仪器无疑对推动这一发展提供了很好助力。文中的研究对简易型路谱数据记录仪的使用提供了数据参考依据。

## 参考文献:

- [1] 彭国勋. 运输包装设计 (第 2 版) [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.  
PENG Guo-xun. Design of Transport Package (2nd Edition)[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [2] CYRIL M, HARRIS, PIERSOL A G. Harris' Shock and Vibration Handbook (5th Edition)[M]. McGraw-Hill, 2002.
- [3] 李昀. 基于 SAVER 技术的家电运输包装设计研究[J]. 物流技术, 2014(18): 48—50.  
LI Jun. Research on Design of Transportation Packaging for Household Appliances Based on SAVER Technology[J]. Technology and Application, 2014(18): 48—50.
- [4] 丁勇, 张贺, 杨懋. 基于典型道路谱的模拟运输振动试验方法研究[J]. 环境技术, 2012(3): 49—52.  
DING Yong, ZHANG He, YANG Mao. Research on Simulating Test Method on Transportation Vibration Based on Typical Road Spectrum[J]. Environmental Technology, 2012(3): 49—52.
- [5] 毕中臣, 周晟, 谢勇. SAVER 在现代包装物流中的应用[J]. 包装学报, 2011(4): 19—22.  
BI Zhong-chen, ZHOU Sheng, XIE Yong. Application of SAVER in Modern Packaging Logistics[J]. Packaging Journal, 2011(4): 19—22.
- [6] 贺志, 周晟, 向红, 等. 运输环境数据采集设备在家电物流中的应用[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 138—142.  
HE Zhi, ZHOU Sheng, XIANG Hong, et al. Application of Transportation Environmental Data Recorder in Logistics of Household Appliances[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 138—142.
- [7] ZHONG C, LI J, KAWAGUCHI K. Measurement and Analysis of Shocks on Small Packages in the Express Shipping Environment of China[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(8/9): 437—449.
- [8] SINGH S P, SINGH J, SAHA K. Measurement and Analysis of Physical and Climatic Distribution Environment for Air Package Shipment[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(8): 719—731.
- [9] CHONHENCHO V, SINGH S P, SINGH J J, et al. Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small-Sized and Medium-sized Trucks and Automobiles[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(1): 31—38.
- [10] BÖRÖCZ P, SINGH S P. Measurement and Analysis of Delivery van Vibration Levels to Simulate Package Testing for Parcel Delivery in Hungary[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(5): 342—352.
- [11] LU F, KITAZAWA H, ISHIKAWA Y. Effect of Vehicle Speed on Shock and Vibration Levels in Truck Transport[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(2): 101—109.
- [12] SINGH S P, SANDHU A P S, SINGH J, et al. Measurement and Analysis of Truck and Rail Shipping Environment in India[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(6): 381—392.
- [13] RISSI G O, SINGH S P, BURGESS G, et al. Measurement and Analysis of Truck Transport Environment in Brazil[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(4): 231—246.
- [14] CHONHENCHO V, SINGH S P, SINGH J J, et al. Measurement and Analysis of Truck and Rail Vibration Levels in Thailand. Packaging Technology and Science, 2010, 23(2): 91—100.
- [15] Official Website of Lansmont. Instruction of Products: SAVER 3X90[EB/OL]. (2018-7-20)[2018-7-26]. <http://www.lansmont.com/products/instruments/lansmont-3x-90/>.
- [16] Shinyei Testing Machinery Co Ltd. User Manual of DER-1000 (Ver 2.01)[M]. Tokyo: Saiwaishobo Press, 2014.
- [17] GOODWIN D, YOUNG D. Protective Packaging for Distribution[M]. Lancaster: DETech Publications Inc, 2011.
- [18] GB/T 4857.4, 包装运输包装件跌落试验方法[S].  
GB/T 4857.5, Package-Transport Packages-Vertical Impact Test method by Dropping[S].
- [19] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin of the Transportation Industry in 2017[EB/OL]. (2017-6-28) [2017-7-15]. [http://www.mot.gov.cn/zfxxgk/bnssj/glj/201706/t20170628\\_2229119.html](http://www.mot.gov.cn/zfxxgk/bnssj/glj/201706/t20170628_2229119.html).
- [20] MCCOOL J I. Using the Weibull Distribution: Reliability, Modeling and Inference[J]. Journal of Applied Statistics, 2014, 41(4): 913—914.