

运输过程中堆码包装件的运动分析

杨晓谦, 钱 怡
(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 建立了双层堆码包装系统动力学模型,对双层堆码包装系统经过路面减速带时的运动情况进行了分析,初步探讨了车速、减速带高度和缓冲材料刚度对运动的影响,并提出了降低冲击力对包装件损伤程度的措施。

关键词: 堆码; 运动分析; 减速带; 材料刚度

中图分类号: TB485. 3; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001—3563(2011)01—0070—04

Kinematic Analysis of Stacking Package in the Transportation Process

YANG Xiao-qian, QIAN Yi
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The kinetic model for double-stack packaging system was established, and the motion of double-stack packaging system when it passed deceleration strip on road surface was analysed, the influence of vehicle speed, height of deceleration strip and buffer material rigidity on motion was preliminarily discussed. Measures for reducing the damage extent of package by impulse force is proposed.

Key words: stacking; kinematic analysis; deceleration strip; material rigidity

在货物运输过程中,堆码包装件因路面激励产生的相互撞击难以避免,这种相互撞击对单个包装件的动态响应影响很大,是缓冲包装设计不可或缺的考虑因素。有关堆码状态下包装件动态响应的研究,已有一些研究成果,如王振林^[1-2]在双层包装系统的冲击响应谱特征方面的研究;王志伟等^[3]的多层堆码包装系统在半正弦脉冲激励下的冲击特性分析;李春飞^[4]在缓冲包装结构对箱装苹果振动损伤与动力学特性方面的研究等等,但他们的分析对象通常简化为连续多自由度质量弹簧阻尼系统。而针对运输过程中,约束较弱的堆码包装件的动态响应分析,尽管 Thakur K P^[5]、耿皓^[6]等已做了部分工作,然而一个完整的堆码包装系统的动力学模型却是必须的。笔者突破传统的质量弹簧系统,建立分段堆码包装系统的动力学模型,探讨冲击力作用下包装件的运动规律。

1 模型与方程

在运输过程中,堆码包装件在一定冲击力作用下,将产生跳跃而彼此脱离,以双层堆码包装系统为

例,其运动和受力情况见图 1。其中 A,B 为包装件,P

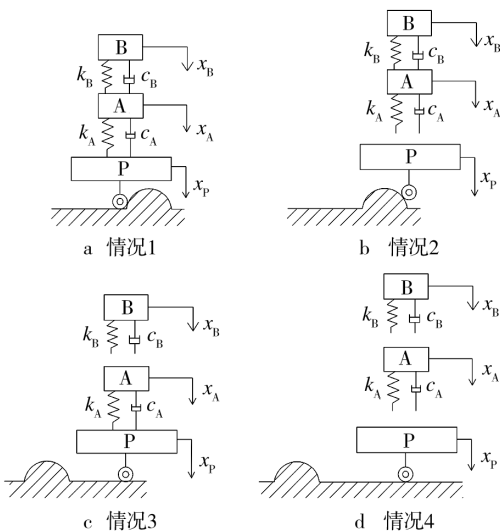


图 1 双层堆码包装系统动力学模型的 4 种情况
Fig. 1 Four cases of kinetic model for double-stack packaging system

为运载体与货物的接触面。与传统的质量—弹簧—阻尼系统不同,模型中的 A,B,P 的运动仅部分受到

弹簧、阻尼的约束,即当包装件向上跳跃时弹簧力、阻尼力则变为零。设 $m_A, m_B, k_A, k_B, c_A, c_B$ 分别为各包装件的质量、接触时的相对刚度和阻尼; U_A, U_B 为系统静平衡时各弹簧的压缩量; Z_A, Z_B 为系统静平衡时各弹簧长度与其压缩到极限时的长度之差; 建立图 1 所示的坐标系, x_A, x_B 的原点在 A, B 的静平衡位置, x_P 的原点在运载体未受路面激励时处, x 轴向下为正。当包装件受到冲击力作用时, 系统的运动方程可用以下 4 种方式表示, 相应的运动形式见图 1。

1) 情况 1。 $-U_B < x_B - x_A < Z_B, -U_A < x_A - x_P < Z_A$ 时, B 与 A, A 与 P 均接触:

$$\begin{cases} m_A \ddot{x}_A = -k_A(x_A - x_P) - c_A(\dot{x}_A - \dot{x}_P) + k_B(x_B - x_A) + c_B(\dot{x}_B - \dot{x}_A) \\ m_B \ddot{x}_B = -k_B(x_B - x_A) - c_B(\dot{x}_B - \dot{x}_A) \end{cases}$$

2) 情况 2。 $-U_B < x_B - x_A < Z_B, x_A - x_P < -U_A$ 时, B 与 A 接触、A 与 P 分离:

$$\begin{cases} m_A \ddot{x}_A = k_B(x_B - x_A) + c_B(\dot{x}_B - \dot{x}_A) + (m_A + m_B)g \\ m_B \ddot{x}_B = -k_B(x_B - x_A) - c_B(\dot{x}_B - \dot{x}_A) \end{cases}$$

3) 情况 3。 $x_B - x_A < -U_B, -U_A < x_A - x_P < Z_A$ 时, B 与 A 分离, A 与 P 接触:

$$\begin{cases} m_A \ddot{x}_A = -k_A(x_A - x_P) - c_A(\dot{x}_A - \dot{x}_P) - m_B g \\ m_B \ddot{x}_B = m_B g \end{cases}$$

4) 情况 4。 $x_B - x_A < -U_B, x_A - x_P < -U_A$ 时, B 与 A, A 与 P 均分离:

$$\begin{cases} m_A \ddot{x}_A = m_A g \\ m_B \ddot{x}_B = m_B g \end{cases}$$

当装载货物的车辆受到路面激励时, 包装件的运动通常是上述 4 种形式的组合。

2 运动分析实例

以汽车行驶过减速带为例, 分析双层堆码包装系统的运动情况。减速带横截面近似梯形或弧形, 见图 2。其宽度 L 为 $(300 \pm 5) \text{ mm} \sim (400 \pm 5) \text{ mm}$, 高度

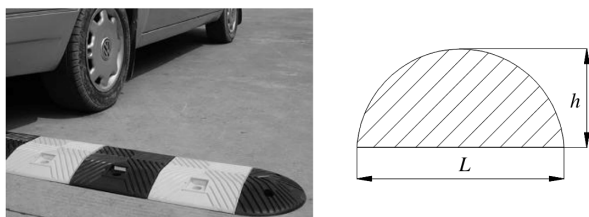


图 2 减速带形状

Fig. 2 Shape of deceleration strip

h 为 $(25 \pm 2) \text{ mm} \sim (70 \pm 2) \text{ mm}$ 。

将减速带对汽车车厢造成的冲击力近似成向上的半正弦冲击激励, 即:

$$x_p = \begin{cases} A \sin(\omega t) & (0 \leq t \leq \tau) \\ 0 & (t > \tau) \end{cases}$$

由于汽车自身有一定的缓冲减震功能, 使得车厢所受激励的幅值小于实际路面障碍物的高度, 不同的车辆, 其缓冲程度也有所不同。实测东风 EQ1156W3 型号的载货汽车在 B 级公路上行驶时的缓冲减震程度为 50% 左右^[7], 故 $A = 0.5 h$ 。另外, 假设包装系统各层为相同的产品, 质量相等, 各层使用相同的线性包装材料且每个包装件的底部与顶部包装结构和形式相同。即 $m_A = m_B, k_A = 2k_B, c_A = c_B$ 。

下面取幅值 $A = 25 \text{ mm}, L = 350 \text{ mm}$, 车速 $v = 30 \text{ km/h}, m_A = m_B = 5 \text{ kg}, k_A = 2k_B = 16 \text{ kN/m}, c_A = c_B = 10 \text{ N} \cdot \text{s/m}, Z_A = Z_B = 12 \text{ mm}$, 算得 $U_A = U_B = 6.125 \text{ mm}$, 以此为例具体分析双层堆码包装系统的运动情况, 以及其位移、速度变化情况。

由于系统在受到冲击力作用后会不停上下跳动直至能量耗尽, 但对于产品来说, 第一次撞击的损伤最大, 所以仅关注系统受到冲击力后前几个运动状态。采用龙格-库塔法求解上述运动方程组, 根据所得结果绘制出的系统最初的几个运动情况见图 3。

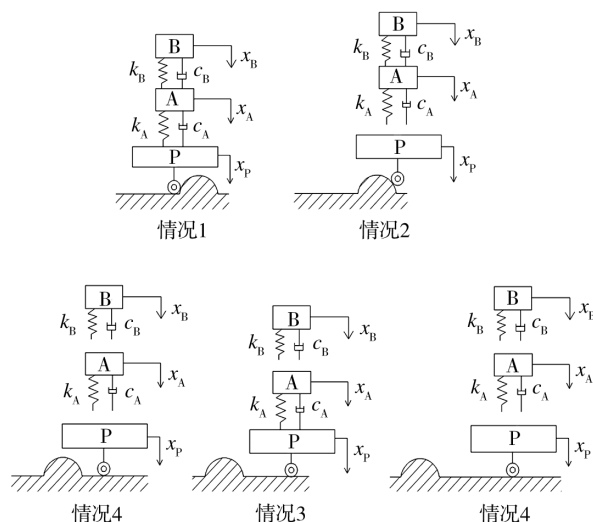


图 3 双层包装系统运动情况

Fig. 3 Motion of double-layered packaging system

双层堆码包装系统在受到半正弦激励时的具体运动情况为: 当 $t \in (0, 0.03399] \text{ s}$ 时系统的运动为情况 1, 当 $t \in (0.03399, 0.0686] \text{ s}$ 时系统的运动为情

况 2, 当 $t \in (0.068\ 6, 0.100\ 6]$ s 时为情况 4, 当 $t \in (0.100\ 6, 0.165]$ s 时为情况 3, 当 $t \in (0.165, 0.257\ 3]$ s 时为情况 4, 当 $t \in (0.257\ 3, 0.302\ 6]$ s 时为情况 2。设物体 A 与物体 B 的位移、速度向下为正, 其曲线见图 4, 其中情况 1—4 分别用符号“①”, “②”, “③”, “④”表示。

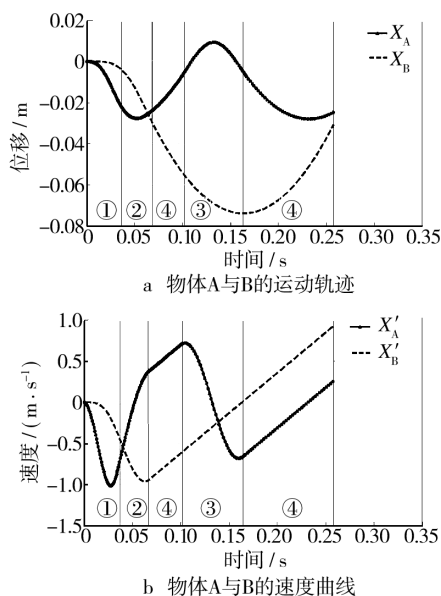


图 4 双层包装系统的响应

Fig. 4 Response of double-layered packaging system

当 $t = 0.100\ 6$ s 时, 物体 A 撞击接触面 P, 此时 $v_A = 0.706\ 8$ m/s; 当 $t = 0.257\ 3$ s 时, 物体 A 与物体 B 相撞, 此时 $v_A = 0.250\ 2$ m/s; $v_B = 0.919\ 3$ m/s。

3 影响包装件运动的主要因素

3.1 车速

分别取 $v = 20, 30$ 和 40 km/h, 其它已知条件与运动分析实例中相同。此时系统的运动规律见图 3, 物体 A 和 B 的位移、速度曲线见图 5 (设它们的位移、速度向下为正)。

由图 5 可以看出, 车速越大, 系统的响应越快, 但系统的位移、速度不一定在每个时间段都随着车速的增大而加大, 总体来看, 车速对系统的速度影响不大, 对系统的位移影响较大, 特别是对 B 物体的位移影响很大。当车速增加一倍, 最大速度变化在 15% 左右, 而 B 物体的最大位移减小了 75% 左右。

3.2 减速带高度

依次取 $h = 30, 50$ 和 70 mm, 即冲击幅值 $A = 15,$

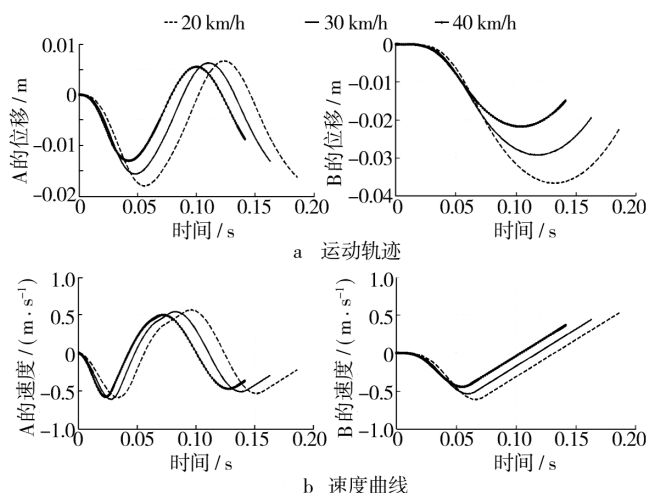


图 5 不同车速下系统的响应

Fig. 5 Response of system at different speed of vehicle

25 和 35 mm, $v = 20$ km/h, 其它已知条件与运动分析实例中相同。此时系统的运动规律见图 3, 物体 A 和 B 的位移、速度曲线见图 6 (设它们的位移、速度向下为正)。

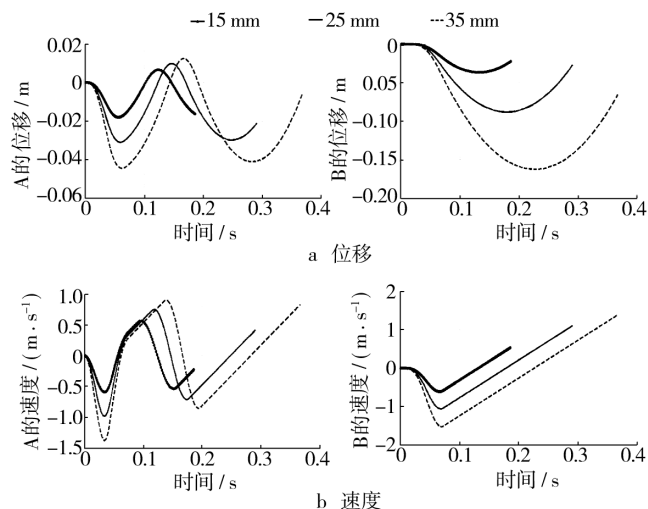


图 6 不同冲击幅值下系统的响应

Fig. 6 Response of system at different impulse amplitude

由图 6 知, 冲击幅值越大即减速带高度越高, 系统的响应越快且持续时间越长。当减速带高度增加 1.3 倍时, A 物体的最大位移、速度也相应增大了 1.3 倍左右, 而 B 物体的最大位移增大了 3 倍, 最大速度增大了 2 倍。可见, 减速带高度是影响系统跳动程度的重要因素。

3.3 包装件间材料刚度

取 $k_A = 2k_B = 16, 36$ 和 120 kN/m, 相应算得 U_A

$=U_B=6.125, 2.722$ 和 0.817 mm, $A=15$ mm, 其它已知条件与运动分析实例中相同。此时系统的运动规律见图 3, 物体 A 和 B 的位移、速度曲线见图 7 (设它们的位移、速度向下为正)。

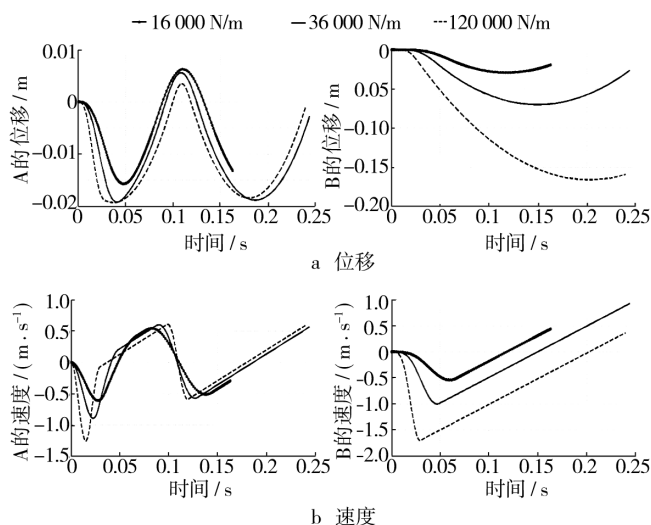


图 7 不同刚度下系统的响应

Fig. 7 Response of system at different rigidity

从图 7 可知, 材料刚度越大, 系统的响应越快, 刚度越小, 在受到外部激励时, 反应越慢, 且响应持续时间较短, 跳动越小。

4 结论和减小撞击的措施

通过分析不同路面激励幅值、车速和包装件材料刚度下的系统运动, 得到如下结论:

1) 当车辆经过减速带时, 双层堆码包装系统的 2 个包装件都会产生一定的跳动, 且在一定刚度、车速和减速带高度范围内, 系统最初的几个运动方式相同, 见图 3。

2) 以不同的速度通过减速带时, 车速越大, 系统的响应越快, 但系统的位移、速度不一定在每个时间段都随着车速的增大而加大, 总体来看, 车速对系统的速度影响不大, 对系统的位移影响较大。

3) 减速带的高度在很大的程度上影响包装系统的运动响应, 高度越大, 包装件跳动的越厉害, 对包装件的损害越严重。

4) 包装材料刚度越大包装件跳动的越高, 相互撞击时的速度越大, 对包装件的损伤越大。

根据以上结论, 提出以下减小包装件相互撞击的

措施:

1) 适当减小包装材料刚度能有效减小包装件跳动、撞击的剧烈程度, 更好地保护产品。

2) 在汽车通过减速带时, 物体 B 跳跃现象较严重, 特别是当减速带变高时, 物体 B 的跳跃高度成倍加大, 这就导致其回落与 A 物体碰撞时冲击力更大, 使得系统损伤更加严重。鉴于此, 可以尝试将物体 B 与物体 A 捆绑在一起, 以减小货物间相互冲撞带来的损伤。

参考文献:

- [1] 奚德昌, 王振林. 包装动力学中的若干问题[J]. 包装工程, 1999, 21(3): 1-5.
- [2] 奚德昌, 陈庆华, 王振林. 包装结构设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
- [3] 王军, 王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 106-109.
- [4] 李春飞. 缓冲包装结构对箱装苹果振动损伤与动力学特性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 26(3): 10-13.
- [5] THAKUR K P, PANG D. Simulating Complex Loading Patterns in the Stack of Packages[J]. Proceedings of the 10th IAPRI World Conference on Packaging, Melbourne, 1997.
- [6] 耿皓. 包装间隙对包装件跌落时的影响研究[J]. 包装工程, 2004, 25(6): 13-15.
- [7] 胡红元. 货物捆绑包装运输系统动力学仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.