可空投系留平台空投跌落冲击响应研究

饶进军,黄锦辉,冯俊兴

(上海大学,上海 200072)

摘要:目的 实现可空投系留平台软着陆,为优化可空投系留平台的隔振缓冲设计提供理论参考。方法 将可空投系留平台等效为二自由度非线性隔振缓冲系统,在 Matlab 环境中,采用四阶龙格-库塔方法,对可空投系留平台跌落冲击响应进行数值仿真,并分析系统参数对系留平台中继模块空投跌落冲击响应的影响。结果 得到动态响应数据和曲线,避免了大量破坏性试验,得到不同参数条件下的跌落冲击仿真结果。结论 根据隔振缓冲仿真系统的动态响应规律,可对隔振缓冲包装的安全性进行评估,实时修改设计参数,有效地提高隔振缓冲包装设计的精确性和经济性。

关键词:系留平台;隔振缓冲;非线性;跌落冲击;数值仿真

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2014)21-0020-05

Airdropped Impact Effect of Airdropped Tethered Balloon Platform

RAO Jin-jun, HUANG Jin-hui, FENG Jun-xing (Shanghai University, Shanghai 200072, China)

ABSTRACT: Objective To achieve soft landing of tethered balloon platform and to provide reference for the design of isolating and cushioning of tethered balloon platform. **Methods** The airdropped tethered balloon platform was equivalent to a two-degree-of-freedom nonlinear vibration system. Numerical simulation on airdropping impact of airdropped tethered balloon platform was conducted with the method of Runge-Kutta in Matlab environment. The effects of the system parameters on the airdropped impact effect of airdropped tethered balloon platform were also analyzed. **Results** The dynamic response data and curve in Matlab environment were obtained, and destructive tests were avoided. The parameters could be easily modified, and the airdrop simulation under different parameters were obtained. **Conclusion** The security of vibration isolating and cushioning pack was assessed according to the dynamic response rules of vibration isolating and cushioning simulation system. The design parameters were real-time revised, which effectively improved the accuracy and economy of the design of vibration isolating and cushioning pack.

KEY WORDS: tethered balloon platform; vibration isolating and cushioning; nonlinear; airdrop impact; numerical simulation

近年来,重大自然灾害如地震、雪灾等事件频发,由于公路铁路断裂塌陷、桥梁损毁,救援装备和物资短时间内无法通过公路、铁路运输至灾区,采用飞机伞降空投为实现快速有效抢险救援行动提供了可能

性¹¹。提出了一种可空投系留平台,即采用空投的方式将系留平台送入目标区域,不仅可以替代伞兵完成突发事件现场所需的通信联络、灾情勘察与评估等功能,同时大幅降低救援风险,提高救援效率,为救援争

收稿日期: 2014-06-16

基金项目: "十二五"科技支撑计划项目(2013BAK03B01-02)

作者简介: 饶进军(1978—),男,江西丰城人,上海大学副研究员,主要研究方向为特种机器人与应用。

通讯作者:黄锦辉(1989—),男,河南漯河人,上海大学硕士生,主攻系留平台隔振缓冲系统。

取宝贵的时间,节省人力与物力。

1 可空投系留平台隔振缓冲设计

系留平台系统是以系留气球为搭载平台,以预警、通信及监测等任务系统为有效载体组成的电子信息系统^[2]。可空投系留平台软着陆后可实现自动升空,并开展现场通信中继和环境勘察与评估等工作。空投跌落冲击对于整个系统尤其是搭载的任务设备等精密仪器非常不利,为实现可空投系留平台软着陆,在降落伞减速的基础上,必须设计合理的着陆缓冲装置^[3—4],对中继模块等任务设备进行隔振和缓冲,使冲击加速度降低到合理范围。

根据可空投系留平台的工况和总体要求,确定可空投系留平台着陆缓冲装置的设计方案,主要由组合式框架、蜂窝缓冲结构以及缓冲衬垫等组成,蜂窝缓冲结构采用统一规格的蜂窝纸板交错叠合而成,并固定于组合式框架底部外侧,系留平台的气球囊体、中继模块和高压氦气储气瓶等组件通过一定方式安置于组合式框架内,并通过系留平台压紧组件的压紧细绳实现系留气球囊体约束定位¹⁵,见图1。压紧组件采用结绳式捆扎约束机构,由脱钩器、压紧杆和压紧绳等零部件组成,见图2。压紧组件主要实现系留平台的定位约束,避免系留平台在空投跌落过程中因重力、风力等外界因素发生松动或脱落。

系留气球囊体 压紧细绳 中继模块 高压氦气储气瓶

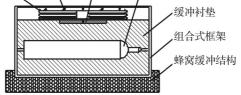


图1 可空投系留平台着陆缓冲装置

Fig.1 The structure of vibration isolating and cushioning landing device

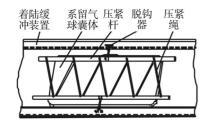


图2 系留平台压紧组件

Fig. 2 The structure of the pressing assembly

可空投系留平台着陆冲击时,首先通过蜂窝缓冲结构的压溃,吸收冲击能量,延缓冲击时间,对系留平台进行隔振缓冲,纸质蜂窝结构特性可以避免着陆冲击后的回弹^[6-7];其次,通过组合式框架机械结构承受剩余冲击载荷^[8],可以降低传递到系留平台的冲击加速度峰值;另外,缓冲衬垫和结绳式捆扎约束机构的弹性绑缚也可以减缓系留平台空投跌落时的冲击振动。

2 可空投系留平台跌落冲击动力学模型

将可空投系留平台作为整体进行研究,中继模块是可空投系留平台的关键部件,适当地安装于着陆缓冲装置中,并与着陆缓冲装置构成一个振动系统。跌落冲击时,着陆缓冲装置对系留平台提供支撑力和弹性恢复力,并与地面构成振动系统。组合式框架相当于刚性支座,考虑到蜂窝纸板缓冲材料的非线性特性[9-11],将可空投系留平台等效为二自由度非线性隔振缓冲系统[12-14],其跌落冲击动力学模型见图3。

假设中继模块和着陆缓冲装置的质量分别为 m_1 和 m_2 ,中继模块和着陆缓冲装置的形变量分别为 x_1 和 x_2 ,中继模块与着陆缓冲装置连接的等效弹性系数和等效阻尼系数分别为 k_1 和 c_1 ,着陆缓冲装置的阻尼系数为 c_2 ,蜂窝纸板缓冲材料具有非线性特性。根据牛顿第二定律,建立可空投系留平台跌落冲击动力学模型微分方程:

$$\begin{cases}
 m_1 \ddot{x} + k_1 (x_1 - x_2) + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \\
 m_2 \ddot{x}_2 + F_k + c_2 \dot{x}_2 - k_1 (x_1 - x_2) - c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0
\end{cases}$$
(1)

式中, F_k为着陆缓冲装置跌落冲击时蜂窝纸板的 非线性载荷, 其力-形变弹性模型见图 4。

力F与形变x之间的双曲正切型函数关系为[15]:

$$F_k = F_0 \operatorname{th} \left(\frac{k_0 x_2}{F_0} \right) \tag{2}$$

式中, F_0 为载荷极限; k_0 为缓冲材料的初始刚度系数。对式(2)两边求导,得:

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}x} = \frac{k_0}{\mathrm{ch}^2 (k_0 x/F_0)}$$

$$\left. \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}x} \right|_{x=0} = \frac{k_0}{1^2} = k_0$$

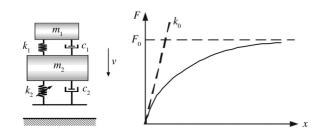


图 3 可空投系留平台跌落冲击动力学模型

Fig.3 Airdrop impact dynamics model of the airdropped tethered balloon platform

图 4 蜂窝纸板缓冲材料力-形 变弹性模型

Fig.4 The force-deformation elastic model of the honeycomb paperboard cushioning material

由此可知,在x=0处的值即为双曲正切型载荷-变形曲线在原点处的斜率,即蜂窝纸板缓冲材料在初始变形时的刚度系数 k_0 ;当 $x\to\infty$ 时, $F\to F_0$,说明 F_0 为载荷极限。通过蜂窝纸板缓冲材料,不论形变如何增大,传递到产品上的力增大到一定程度后就不再继续增大,而是在某个范围内。将蜂窝纸板缓冲材料力-形变弹性模型公式(2)代入式(1)得:

$$\begin{cases} m_1\ddot{x} + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0\\ m_2\ddot{x}_2 + F_0 \text{th}\left(\frac{k_0 x_2}{F_0}\right) + c_2\dot{x}_2 - k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \end{cases}$$
(3)

初始条件为: $x_{1,2}(t)\mid_{t=0}=0,\dot{x}_{1,2}(t)\mid_{t=0}=v_{0}$ 。

由于可空投系留平台隔振缓冲系统具有非线性特性,因此采用四阶五级的Runge-Kutta数值解法求解^[16-17]。求解前对式(3)进行无量纲化处理,引入无量纲化的位移和时间。

取
$$L = \frac{F_0}{k_0}$$
 , $T = \sqrt{\frac{m_2}{k_0}}$, $X = \frac{x}{L}$, $\tau = \frac{t}{T}$, 则可空

投系留平台跌落冲击无量纲化的方程为:

$$\begin{cases} m_1 \frac{L}{T^2} X_1^{''} + k_1 L(X_1 - X_2) + c_1 \frac{L}{T} (X_1^{'} - X_2^{'}) = 0 \\ m_2 \frac{L}{T^2} X_2^{''} + F_0 \text{th} (\frac{k_0}{F_0} L X_2) + c_2 \frac{L}{T} X_2^{'} - k_1 L(X_1 - X_2) - c_1 \frac{L}{T} (X_1^{'} - X_2^{'}) = 0 \end{cases}$$

$$(4)$$

 $\diamondsuit \lambda = rac{m_1}{m_2}$, $eta = rac{\omega_1}{\omega_2}$,根据振动频率和阻尼比计算

公式,分别得到中继模块和着陆缓冲装置的振动频率

$$\omega$$
 、阻尼比 ζ : $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$, $\omega_2 = \sqrt{\frac{k_0}{m_2}}$,
$$\zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{m_1k_1}}, \zeta_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{m_2k_0}}, 代入式(4), 得:$$

$$\begin{cases} X_1^{''} + \beta^2(X_1 - X_2) + 2\zeta_1\beta(X_1^{'} - X_2^{'}) = 0 \\ X_2^{''} + \text{th } X_2 + 2\zeta_2X_2^{'} - \lambda\beta^2(X_1 - X_2) - 2\lambda\zeta_1\beta(X_1^{'} - X_2^{'}) = 0 \end{cases}$$
 初始条件: $x_{1,2}(\tau) \mid_{\tau=0} = 0, X_{1,2}^{'}(\tau) \mid_{\tau=0} = v = 0$

$$\frac{T}{I}v_0 = \sqrt{m_2k_0}v_0/F_0$$

Matlab 提供了一系列求解常微分方程的函数,如 ode23()、ode45()和 ode113()等,对式(5)采用四阶五级的 Runge-Kutta 方法求解,由于 ode45()函数[18]只能处理显示一阶微分方程组标准型问题,因此对式(5)进行降阶处理。令 $u_1 = X_1', u_2 = X_2', 则$:

$$\begin{cases} X_{1}^{"} = -\beta^{2}(X_{1} - X_{2}) - 2\zeta_{1}\beta(X_{1}^{'} - X_{2}^{'}) \\ X_{1}^{'} = u_{1} \\ X_{2}^{"} = -\operatorname{th} X_{2} - 2\zeta_{2}X_{2}^{'} + \lambda\beta^{2}(X_{1} - X_{2}) + \\ 2\lambda\zeta_{1}\beta(X_{1}^{'} - X_{2}^{'}) \\ X_{2}^{'} = u_{2} \end{cases}$$
初始条件: $X_{1,2}(\tau)|_{\tau=0}=0, \mu_{1,2}(\tau)|_{\tau=0}=$

$$X_{1,2}^{'}$$
 (τ)| $_{\tau=0}=\frac{T}{L}$ $v_0=\sqrt{m_2k_0}$ v_0/F_0 ,可空投系留平台

加速度响应可表示为: $\ddot{x}_{1,2} = \frac{L}{T^2} X_{1,2}^{"} = \frac{F_0}{m_2} X_{1,2}^{"}$ 。

3 仿真分析

3.1 典型参数条件下系留平台跌落冲击响应分析

式(6)经过降阶处理后,由二元二阶微分方程组变成四元一阶微分方程组,同时引入了2个新的自变量 u_1 和 u_2 ,采用四阶五级Runge-Kutta方法的标准格式求解。在Matlab仿真环境中,可以较方便地获得不同参数条件下的系留平台空投跌落冲击响应,并实现数据的可视化。选择系统典型参数无量纲的跌落速度v=20、质量比 $\lambda=0.2$ 、频率比 $\beta=0.5$,以及阻尼比 $\zeta:=0.3$ 和 $\zeta:=0.3$ 。可空投系留平台在典型参数条件下跌落冲击的位移、速度和加速度时域响应见图 5。

从可空投系留平台系统在典型参数条件下的跌

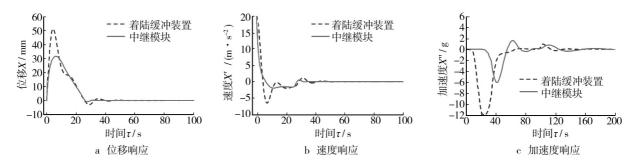


图 5 系留平台跌落冲击的位移、速度和加速度时域响应

Fig.5 The time-domain response of displacement, velocity and acceleration of the airdropped tethered balloon under typical parameter conditions

落冲击时域响应图可知,通过着陆缓冲装置吸收冲击 载荷和延缓冲击时间,实现对易损件中继模块的隔振 缓冲作用,主要表现为以下几方面。

- 1) 中继模块的位移响应 X_1 峰值和速度响应 X_1 峰值均小于着陆缓冲装置的响应峰值,响应曲线的波动性和振荡性均相应减小。
- 2)中继模块的加速度响应X₁"峰值通过着陆缓冲装置的缓冲后大大减小,相比于着陆缓冲装置的峰值出现时刻具有一定的延迟性,响应曲线上下振荡后由于阻尼的作用趋于平稳。

3.2 系统参数对中继模块空投跌落冲击响应影响分析

可空投系留平台在空投跌落冲击过程中,中继模块等易损件的空投跌落冲击响应关系到整个系留平

台的正常工作,因此,以中继模块为例,分析系统参数 对其空投跌落冲击响应的影响。

取着陆瞬时速度v分别为 10, 20, 40 m/s; 取质量比 λ 分别为 0.05, 0.1, 0.5; 取频率比 β 分别为 0.1, 0.5, 1; 取阻尼比 ζ_1 分别为 0.05, 0.25, 0.5; 取阻尼比 ζ_2 分别为 0.05, 0.25, 0.5。得到不同参数条件下的中继模块空投跌落冲击最大加速度响应, 见图 6。

在可空投系留平台隔振缓冲设计的基础上,通过 系统参数对中继模块空投跌落冲击响应的影响进行 分析,可空投系留平台着陆隔振缓冲系统改进设计时 应该考虑以下几点。

1) 中继模块和着陆缓冲装置的加速度响应峰值 均与着陆瞬时速度v成正比,跌落冲击环境越恶劣,中 继模块越容易破损。可空投系留平台的着陆瞬时速

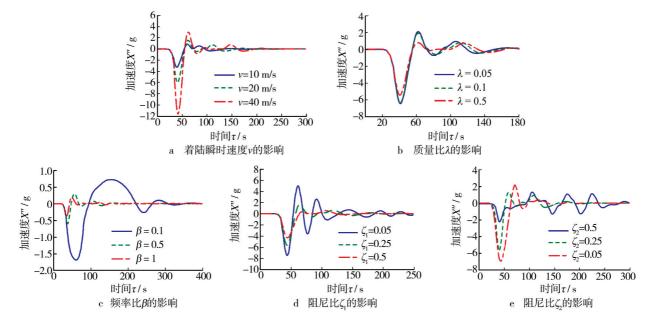


图 6 不同参数条件下中继模块跌落冲击最大加速度响应

Fig.6 The maximum acceleration response of relaying module's airdropping impact under different parameters

度 v 在合理范围内尽可能选择下限值。

- 2)中继模块与着陆缓冲装置的质量比 λ 对中继模块跌落冲击响应有一定的影响,质量比 λ 越小,中继模块跌落冲击的加速度峰值越大,所受冲击越大。在中继模块质量m,确定的情况下,应该尽可能减小着陆缓冲装置的质量m2,以改善可空投系留平台的隔振缓冲效果。
- 3) 当系统参数确定后,可以增大中继模块与着陆缓冲装置的频率比 β 和中继模量阻尼比 ξ_1 ,从而减小中继模块加速度响应峰值和波动性;适当增大着陆缓冲装置阻尼 ξ_2 ,可以减小中继模块加速度响应峰值,但会影响响应曲线的波动性,因而应该控制在一定的范围内。

4 结语

在 Matlab 仿真环境中,利用龙格-库塔方法对具有2个自由度以上的非线性复杂系统进行快速高效的仿真分析,得到动态响应数据和曲线,避免了大量破坏性试验,且参数修改方便,可得到不同参数条件下的跌落冲击仿真结果。根据隔振缓冲仿真系统的动态响应规律,可对隔振缓冲包装的安全性进行评估,实时修改设计参数,有效地提高了隔振缓冲包装设计的精确性和经济性。

参考文献:

- [1] 杨伟. 一种基于浮空平台的通信系统应用[J]. 通信与信息 技术,2010,11(4):73—74.
 - YANG Wei. A Communication System Based on the Application of Floating Platform[J]. Communication and Information Technology, 2010, 11(4):72—74.
- [2] 史献林,余莉,施红. 系留气球升空过程的动态模拟[J]. 航空学报,2009,30(4):609—613.
 SHI Xian-lin, YU Li, SHI Hong. Dynamic Simulation of Ascending Tethered Balloon[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica
- [3] 杨振波. 军用包装件跌落冲击问题的仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学,2010.

Sinica, 2009, 30(4):609—613.

- YANG Zhen-bo. Simulation Study on Drop Impact of Military Product Packages[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [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):54-58.

XUE Fei, ZHANG Wei. Control and Data Acquisition Processing System of Drop Impact Testing Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23):54—58.

- [5] 饶进军,冯俊兴,黄锦辉. 高压储气瓶的空投隔振缓冲装置:中国,ZL201320591382.0[P]. 2013-09-25.
 - RAO Jin-jun, FENG Jun-xing, HUANG Jin-hui. A Vibration Isolation Buffer Device Applied for High-pressure Gas Cylinders Airdropping: China, ZL201320591382.0[P]. 2013-09-25.
- [J]. 包装工程,2013,34(23):1—3.
 - SONG Zhong-zhen, WANG Jun, WANG Jun. Effect of Vibration Fatigue on Cushion Performance of Honeycomb Paper-board[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23); 1—3.
- [7] 王保升,张丽. 二次加载时蜂窝纸板的缓冲性能研究[J]. 包装工程,2011,32(15):62—65.
 - WANG Bao-sheng, ZHANG Li. Research on Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard under the Second Load[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15):62—65.
- [8] 王晓峰. 框架结构动力稳定性分析的新方法研究[D]. 广西:广西大学,2012.
 - WANG Xiao-feng. Study on the New Methods for Dynamic Stability of Frame Structures[D]. Guangxi; Guangxi University, 2012.
- [9] 卢富德,高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统 跌落冲击研究[J]. 振动工程学报,2012,25(3):335—341. LU Fu-de, GAO De. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012,25(3): 335—341.
- [10] 高德,卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究[J]. 振动工程学报,2012,25(1):6—11. GAO De, LU Fu-de. The Shock Response of Hyperbol ic Tangent and Tangent Comprehensive Model on Cushion System Considering Rotary Motion[J]. Journal of Vibration Engineering,2012,25(1):6—11.
- [11] ZHANG Shao-yun, CHU Huo, LU Fu-de, et al. Finite Element Analysis for Dynamic Response of Cushioning System Made out of Honeycomb Paperboard and Foam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 32(2):52—54,63.
- [12] 汤伯森. 包装动力学[M]. 北京:化学工业出版社,2011. TANG Bo-seng. Packaging Dynamics[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2011.
- [13] 姜久红,王志伟.二自由度线性系统跌落响应影响因素分 (下转第41页)

[5] 谭辉,刘奇龙,滑广军. 基于Flash8平台的瓦楞纸箱CAD软件开发研究[J]. 包装工程,2009,30(12):71—73.

TAN Hui, LIU Qi-long, HUA Guang-jun. Development of Corrugated Paper Box CAD Software Based on Flash8[J].

Packaging Engineering, 2009, 30(12):71-73.

- [6] 王潍,王勃,王艳芳,等. Solid Edge 基础应用与实践[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
 WANG Wei, WANG Jin, WANG Yan-fang, et al. Application and Practice of Solid Edge[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2011.
- [7] 何自芬,张印辉. 基于有限元法的包装箱抗压性能研究[J]. 包装工程,2009,30(3):39—41.

 HE Zi-fen, ZHANG Yin-hui. Study of Compression Resistance of Packaging Box Based on Finite Element Method[J]. Packaging Engineering,2009,30(3):39—41.
- [8] 段艳健,钱怡. 基于 ANSYS Workbench 的瓦楞纸箱抗压性能仿真研究[J]. 包装工程,2012,33(9):23—26.

 DUAN Yan-jian, QIAN Yi. Simulation Study of Compression Strength of Corrugated Box Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging Engineering,2012,33(9):23—26.
- [9] TALBI N, BATTI A, AYAD R, et al. An Analytical Homogenization Model for Finite Element Modeling of Corrugated Cardboard[J]. Composite Structures, 2009(8):280—289.
- $[10]\,$ ABOURA Z, TALBI N, ALLAOUI S, et al. Elastic Behavior of

- Corrugated Cardboard: Experiments and Modeling[J]. Composite Structures, 2004(63):53—62.
- [11] AZZI A, BATTINI D, PERSONA A. Packaging Design; General Framework and Research Agenda[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(8):435—456.
- [12] A Computer-aided Methodology to Design Safe Food Packaging and Related Systems[J]. American Institute of Chemical Engineers, 2013, 59(4):1183—1212.
- [13] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社, 2012.
 - PENG Guo-xun. The Packaging Design of Logistics Transport [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [14] 彭国勋. 瓦楞包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社,2013. PENG Guo-xun. Corrugated Packaging Design[M]. Beijing: The Printing Industry Press,2013.
- [15] 孙诚. 纸包装结构设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,2004. SUN Cheng. Paper Packaging Structural Design[M]. Beijing: China Light Industry Press,2004.
- [16] 和克智,曹利杰. 纸包装容器结构设计及应用实例[M]. 北京:印刷工业出版社,2007. HE Ke-zhi, CAO Li-jie. Paper Packaging Containers Struc-
 - HE Ke-zhi, CAO Li-jie. Paper Packaging Containers Structural Design and Examples of Application[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2007.

(上接第24页)

析[J]. 包装工程,2006,27(5):101-103.

JIANG Jiu-hong, WANG Zhi-wei. Study on the Influencing Factors of Dropping Response of Double Degree Freedom Linear System[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 101—103.

- [14] 谢涛. 关键部件跌落冲击响应研究[J]. 包装工程,2005,26 (2):77—78.
 - XIE Tao. Research on the Dropping Shock Response of the Key Parts[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2):77—78.
- [15] 李晓刚. 基于 Matlab/Simulink 的缓冲包装系统动态响应及影响因素分析[J]. 包装工程,2011,32(1):65—68.

 LI Xiao-gang. Analysis of Dynamic Response and Influencing Factors of Cushioning Package Based on MATLAB/Simulink [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1):65—68.

- [16] 陈基明. 数值计算方法[M]. 上海:上海大学出版社,2007. CHEN Ji-ming. Numerical Calculation Method[M]. Shanghai: Shanghai University Press,2007.
- [17] 黄秀玲,王军,卢立新,等.三次非线性包装系统关键部件冲击响应影响因素分析[J]. 振动与冲击,2010,29(10):179—181.
 - HUANG Xiu-ling, WANG Jun, LU Li-xin, et al. Factors Influencing Shock Characteristics of A Cubic Nonlinear Packaging System with Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10):179—181.
- [18] 薛定宇,陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
 - XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. System Simulation Technology and Application Based on MATLAB/Simulink[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.