

# 包装容器运输仿真关键技术研究

**摘要：** 本文介绍了利用数值仿真技术进行包装容器虚拟运输试验的方法与过程。针对产品运输过程的特点，对包装容器的建模以及相应装配技术进行研究，给出了相应的解决方法，并进行了产品和包装容器的运输仿真。获得了包装容器及产品在碎石路面上的受力状态及动力响应，验证了仿真技术的可行性。

**关键词：** 汽车运输 包装容器 有限元

## Study on Key Technologies in Dynamic Simulation of Container Transportation

<sup>1</sup>Sun Jixian <sup>2</sup>Du Hongwei <sup>1</sup>Ma Liang <sup>2</sup>Xu Jiannan <sup>1</sup>Lou Zhenliang <sup>2</sup>Deng Kewen

<sup>1</sup>Plastic Forming Technologies Department, Shanghai Jiao Tong University 200030 Shanghai

<sup>2</sup>Structural Mechanics Research Institute, China Academy of Engineering Physics 621900 Mianyang

**Abstract:** The process and methods of automobile transportation virtual experiment by means of digital simulation technologies are introduced. The modeling and assembling techniques of container and products are studied based on automobile transportation features. The transportation simulation of products and package on a certain Dongfeng truck are conducted. The dynamics responses of the package and products on cobble stone road surface are obtained. The feasibility of simulation techniques presented in this paper is verified.

**Keywords:** Automobile transportation, Container, FEM

### 1. 前言

公路运输试验是新产品研发过程中必须要考虑到的一个环节。大量数据表明，汽车在运输过程中经受的是随机振动和离散冲击的作用。振动引起产品疲劳损伤，冲击使产品可能因达到极限应力而破坏。依照研制任务书的要求，产品运输试验的累积运输距离通常是数千公里。如果采用实地的运输试验，是非常昂贵费时的。随着试验技术的不断发展，运输试验由室外转入室内，利用试验室的设施模拟在现场形成振动、冲击等运输环境中的多种因素。随着 CAE 技术的快速发展及广泛应用，在产品研发的前期可以应用 CAE 技术来检验产品设计的合理性，减少运输试验的次数，降低试验成本，缩短产品的研发周期。本文将对汽车运输数值仿真的关键技术进行研究。

### 2. 汽车运输动态仿真技术方法

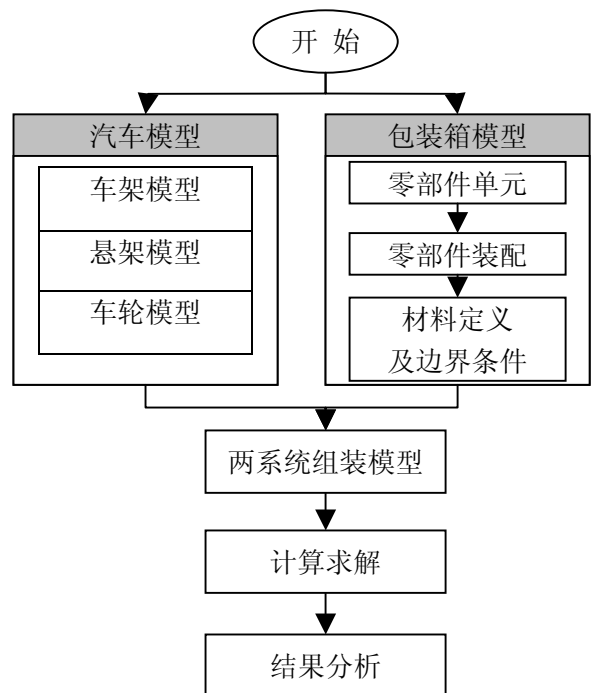


图 1 汽车运输仿真的技术路线

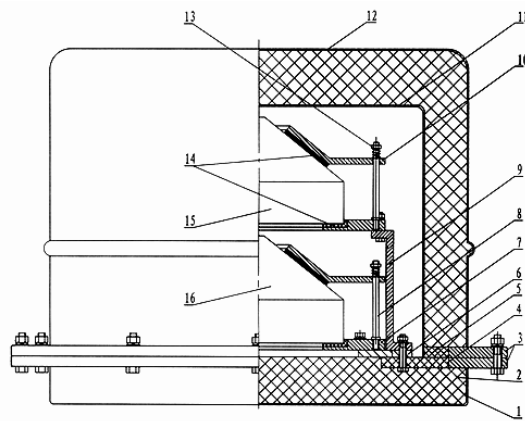
汽车运输动态仿真的目标是将产品在运输过程中的受力情况进行模拟，从而可以进一步获得产品以及运输工具关键部位的可能损伤或疲劳情况。使得在产品研发阶段就避免其使用和运输时的问题。

汽车运输动态数值仿真的基本思路是分别建立运输工具和包装容器的有限元模型，然后将这两个系统组装在一起，使运输工具在特定的路面上行使，分析产品的响应与受力情况。图 1 所示是汽车运输仿真实施的技术路线。

### 3. 包装容器有限元模型的建立

#### 3.1 包装容器零部件网格模型

图 2 所示是包装容器的装配图。首先对包装容器的各个零件进行网格离散化，根据零件在包装容器中所的作用选择合适的单元类型及密度。比如，箱筒的厚度为 2mm，可以采用壳单元；压盘和底盘要承受弯曲效应，因此在厚度方向上至少要分布两层六面体单元，而橡胶垫几乎不承受弯曲作用，因此沿厚度方向可以只分布一层六面体单元。最终划分好的网格模型如图 3 所示。



1-下箱筒 2-聚氨酯泡沫 3-法兰 4-隔板 I 5-隔板 II 6-聚砜 7-底盘 8-支杆  
9-支架 10-压盘 11-内筒 12-上箱筒 13-弹簧 14-橡胶垫 15-产品 16-产品

图 2 包装箱装配图

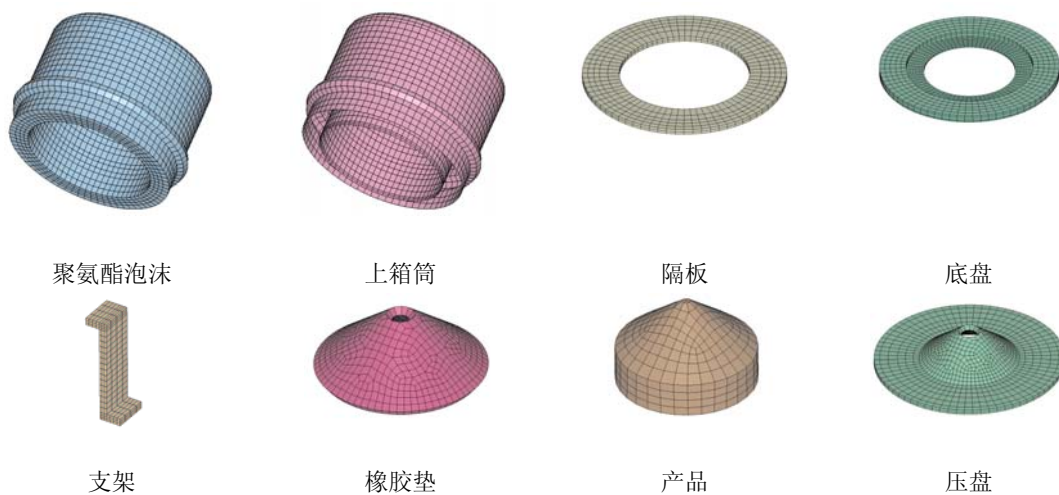


图 3 包装容器部分零件网格

#### 3.2 包装容器有限元装配模型

按照包装容器的装配图将各个零部件的网格模型进行组装，如图 4 所示。两个法兰分别与上箱筒、下箱筒焊接，在网格模型中使法兰与箱筒在连接处共用节点连成一体；上方法兰、隔板 II、上箱筒、内筒与泡沫连成整体，下方法兰、下箱筒、隔板 I、垫板通过泡沫连成整体，在网格模型中通过

使物体在连接处共用节点来处理；包装容器在运输过程中螺栓断裂失效的可能性很小，不考虑螺栓的失效，螺栓连接方式通过采用刚性梁单元模拟；压盘与底盘的连接方式通过在两者间采用梁单元加弹簧单元的连接方式来处理，通过施加弹簧力压紧产品，初始弹力为 100N；在其他可能产生相互作用的零件之间设定接触界面。

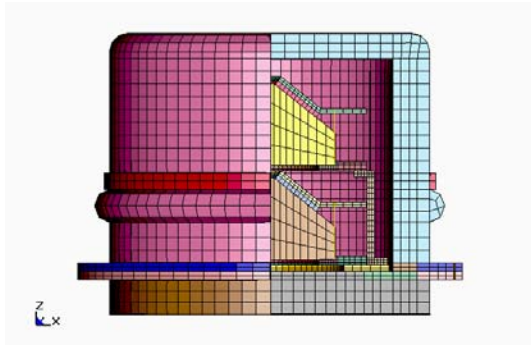


图4 包装容器网格模型装配图

### 3.3 包装容器与汽车的组装

将组装好的包装容器安放到已经建好的汽车模型上，通过三根包带将其固定在汽车平板上。包带用安全带单元\*ELEMENT\_SEATBELT 模拟，施加预紧力。

### 3.4 路面模型

路面以符合美国 MGA 标准的鹅卵石路面为基

础，根据路况的要求在其上增加如图 5(1)所示的凹坑。

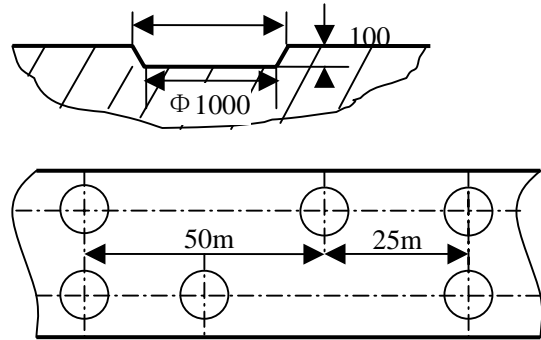


图 5(1) 路面凹坑示意图

Φ

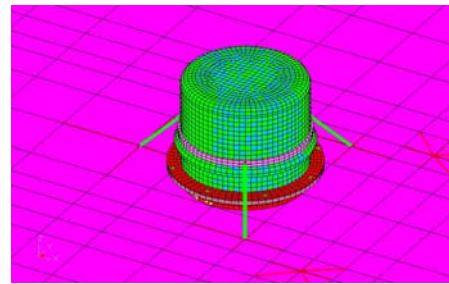
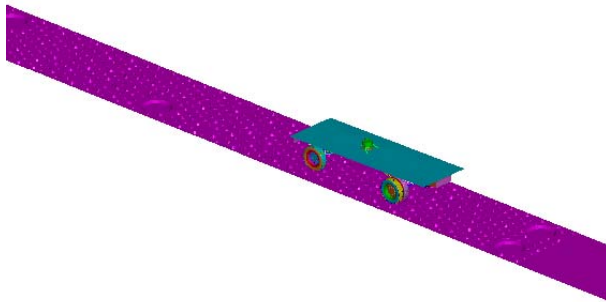


图5 卡车、路面和包装箱的装配模型

## 4. 计算与结果分析

### 4.1 计算方法

汽车运输是一个动态过程，动力显式解法求解的系统方程可表示为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (1)$$

对式(1)的求解采用中心差分法。将时间进行离散化，假设在时刻  $t$  有一时间增量  $\Delta t$ ，由中心差分法，

$$\left[ \frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] u^{t+\Delta t} = F(t) - \left[ K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right] u^t - \left[ \frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] u^{t-\Delta t} \quad (2)$$

利用动力显式有限元软件 LS-DYNA 中对以上

加速度  $\ddot{u}^t$ ，速度  $\dot{u}^t$  可以分别表示为

$$\ddot{u}^t = (\ddot{u}^{t+\Delta t} - 2\ddot{u}^t + \ddot{u}^{t-\Delta t}) / \Delta t^2$$

$$\dot{u}^t = (\dot{u}^{t+\Delta t} - \dot{u}^{t-\Delta t}) / 2\Delta t$$

则有

模型进行计算。使卡车在路面上运行足够的距离，

本例模拟时间为 4 秒。

#### 4.2 包装容器及产品的受力分析

图 6 是两产品质心的加速度曲线。节点 20268 是上方产品的质心，节点 21353 是下方节点的质心。在运行刚开始时，弹簧等弹性零件处于初始状态，在重力作用下，弹性零件被压缩逐渐达到平衡状态，加速度为 0。由曲线可知，经过大约 0.3 秒

以后，包装容器与汽车达到稳定运行状态。通过仿真，可以知道产品及包装容器中各个零部件的受力状态。图 7 是其中一个产品在最大应力发生时的应力分布图。通过产品的基本参数分析可知，符合产品的受力要求，进而可以分析包装容器的受力情况，进行可靠性分析。

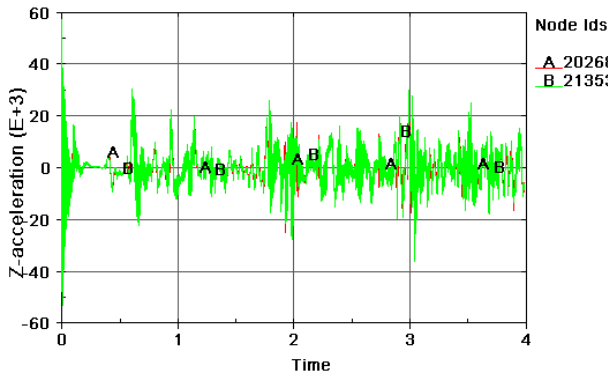


图 6 产品的最大等效应力随时间的变化曲线

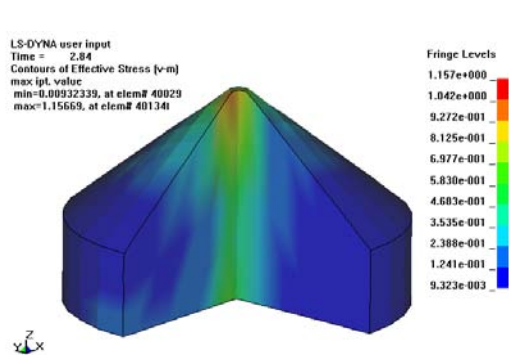


图 7 产品在最大应力发生时的应力分布图

#### 4.2 包装容器关键零件的受力分析

通过仿真可以得到包装容器主要结构在运输过程中的受力变化情况，检验包装容器结构设计的合理性。图 8(a)是上底盘在发生最大应力时的等效应力分布图，最大应力值约为 11.7MPa。图 8(b)是下底盘在发生最大

应力时的等效应力分布图，最大应力值约为 14.56MPa。图 9(a)所示为上压盘在最大应力时的等效应力分布图，等效应力最大值约为 4.14MPa。图 9(b)所示为下压盘在发生最大应力时的等效应力分布图，应力最大值约为 5.0MPa。

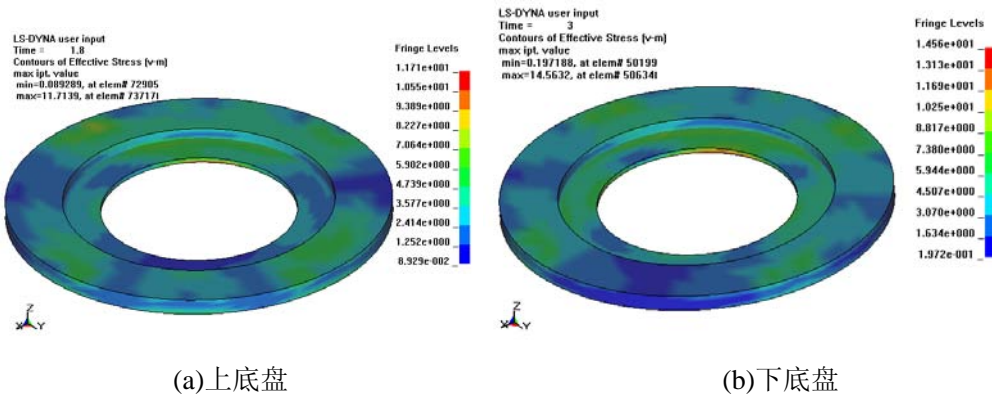
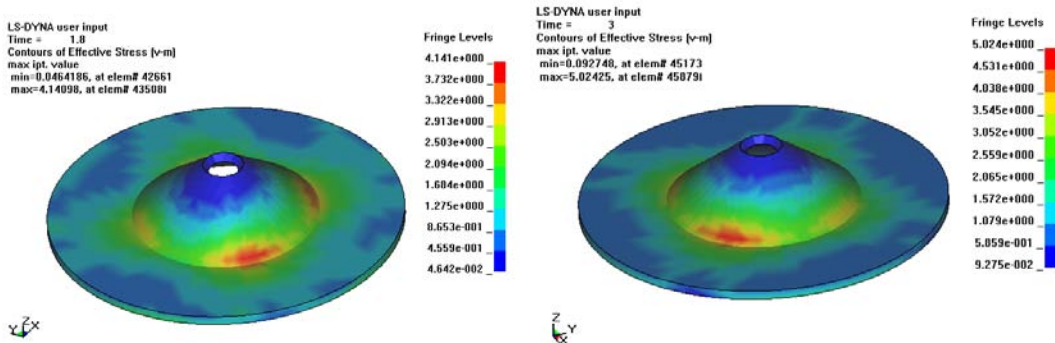


图 8 两产品质心处的加速度曲线



(a) 上压盘

(b) 下压盘

图 9 压盘的等效力分布

### 4.3 包装容器的动力学传递特性

图 10 所示为包带与汽车平板联接点（图中 A、B、C 三点）以及产品质心处（图中 D、E 点）的加速度曲线的比较。从图中可以看出，产品的加速度变化幅度

比包带与汽车平板连接点处的加速度变化幅度要小。这是因为包装容器内的泡沫、橡胶等减震零件吸收了一部分振动能量。

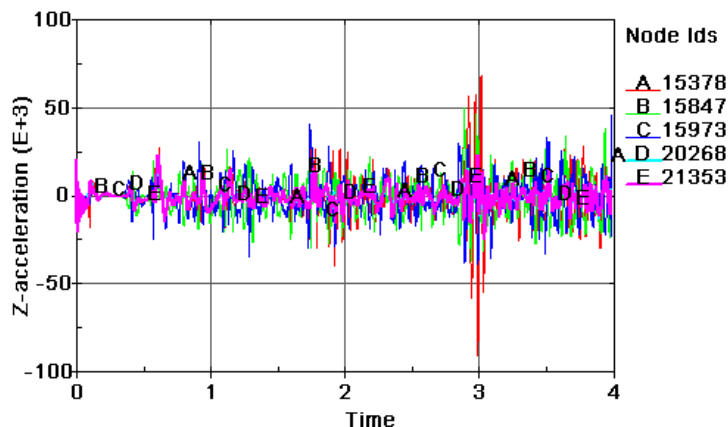


图 10 包带与汽车平板联接点以及产品质心处的加速度曲线

## 5. 结论

- 1) 通过汽车运输数值仿真技术可以预测产品及包装容器在运输过程中的受力情况，为产品及包装容器的结构优化设计提供依据；
- 2) 开发常用运输汽车的有限元模型，将其作为虚拟运输试验的平台，可用来测试不同产品的运输特性；
- 3) 在产品研发的前期阶段利用数值仿真技术可以帮助减少运输试验的次数，降低试验成本，缩短产品的研发周期，提高生产率，产品运输过程中所需要的大部分数据可以通过数值仿真来得到。

[4] LSTC LS-DYNA 960 Keyword User's Manual, 2001

## 致谢

作者在此感谢美国 ETA 公司在本项目中提供的大力支持与帮助。

## 参考文献

- [1] Chang-Ro Lee etc. Validation of a FEA Tire Model for Vehicle Dynamic Analysis and Full Vehicle Real Time Proving Ground Simulations, SAE, 1997
- [2] Yuan Zhang Vehicle Chassis/Suspension Dynamics Analysis - Finite Element Model vs. Rigid Body Model, SAE, 1998
- [3] LSTC LS-DYNA Theory Manual, 1998