

## 基于 LS-DYNA 的修枝机跌落仿真分析

孙亮<sup>1,2</sup>, 陈希良<sup>2</sup>, 齐明思<sup>1</sup>

(1.中北大学, 太原 030051; 2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:** **目的** 寻找修枝机整机跌落时的易破损部件, 以便针对易损部件设计更合理的结构和缓冲防护包装。**方法** 基于 Hypermesh 和 LS-DYNA 软件对修枝机水平跌落、竖直侧向跌落这 2 种极限工况进行仿真分析。**结果** 在 2 种工况下, 旋转管均会发生应力集中, 出现破损, 影响修枝机使用寿命。**结论** 在今后的产品设计中, 要重点对旋转管的结构进行优化设计; 在运输过程中, 要着重针对旋转管部件设计合理的运输包装防护结构。

**关键词:** 修枝机; 旋转管; 跌落仿真; Ansys/LS-DYNA; 运输包装

**中图分类号:** TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0033-05

### Drop Simulation of Pruning Machine Based on LS-DYNA

SUN Liang<sup>1,2</sup>, CHEN Xi-liang<sup>2</sup>, QI Ming-si<sup>1</sup>  
(1.North University of China, Taiyuan 030051, China;

2.Ningbo Institute of Industrial Technology, CAS, Ningbo 315201, China)

**ABSTRACT:** The work aims to find out the quick-wear parts of complete pruning machine at the time of falling off, so as to design a more reasonable structure and buffer protective packaging. Simulation analysis was carried out for two kinds of drop conditions of the pruning machine based on Hypermesh and LS-DYNA, namely horizontal falling and vertical lateral falling. In these two cases, the rotary tube would be subject to stress concentration and damaged. This would affect the service life of the pruning machine. In the following product design, the emphasis should be placed on the optimized design of the rotary tube's structure. In the process of transportation, the stress should focus on the design of a reasonable transport packaging protection structure for the rotary tube components.

**KEY WORDS:** pruning machine; rotary tube; drop simulation; Ansys/LS-DYNA; transport packaging

国际和国内园林修枝机市场基本被国外知名品牌所占据, 近些年国内修枝机企业通过不断改革创新, 逐渐提升了市场竞争力。园林修枝机的主要功能是用于切割和修剪树枝。修枝机在使用过程和运输过程中均可能发生跌落, 这种剧烈冲击会使得修枝机的运动状态在较短时间内发生较大的变化, 从而造成部分关键部位的损坏, 影响修枝机功能。实际情况表明, 修枝机发生水平跌落时, 其旋转管弯折部位发生了破损。

跌落实验发生的历程非常短, 导致实验过程中的现象和内部特征很难被观察到<sup>[1]</sup>。同时, 实验测试的

条件很难控制, 使得跌落实验重复性差。传统的跌落试验逐渐被跌落冲击仿真所取代<sup>[2]</sup>, 用有限元软件来对产品进行跌落仿真分析可以弥补物理样机跌落试验的诸多不足。在有限元软件中只需要建立一个模型就可以进行多个姿态的跌落仿真分析<sup>[2]</sup>, 来得到产品的动态响应和跌落冲击产生的后果。王俊丽等对带有缓冲结构的液晶显示器包装件进行跌落仿真试验, 得到显示器的跌落冲击数据, 为显示器的缓冲结构优化提供指导<sup>[3]</sup>。华丽等对洗衣机运输包装件进行平跌落仿真试验, 探讨了洗衣机运输包装结构强度理论。现

收稿日期: 2016-08-14

基金项目: 宁波市产业技术创新重大专项 (2015B11031)

作者简介: 孙亮 (1993—), 男, 中科院宁波材料所、中北大学联合培养硕士生, 主攻机械 CAE/CAM 等。

通讯作者: 陈希良 (1965—), 男, 博士, 中科院宁波材料所研究员、博导, 主要研究方向为计算力学、振动和动力学分析等。

雪等对高脚杯角跌落进行仿真分析,设计合理的高脚杯缓冲包装<sup>[4]</sup>。有限元软件已被广泛应用于电子、机械、玻璃等产品的跌落仿真研究中<sup>[5]</sup>。仿真的结果可以帮助人们找到产品的易损部件,指导产品结构的优化设计,也能对设计更合理的缓冲包装提供指导。

### 1 分析流程

基于园林修枝机各零部件之间的装配关系,以跌落冲击为修枝机的环境载荷<sup>[6]</sup>,在UG软件中建立修枝机整体三维模型,在Hypermesh中进行简化、仿真分析和前处理,建立修枝机在2种工况下跌落的有限元模型。2种极限跌落工况为水平跌落(由距离地面1m处水平跌落至地面)和竖直跌落(由竖直方向侧向跌落)。运用Ansys/LS-DYNA软件研究修枝机整机跌落响应,分析模型的应力、应变和加速度变化情况<sup>[7]</sup>,寻找出修枝机整机跌落时易发生破损的部件。研究方法着眼于观察仿真试验中修枝机在各时间点的应力应变变化情况,并结合加速度的时间历程曲线进行分析,具体分析流程<sup>[8]</sup>见图1。

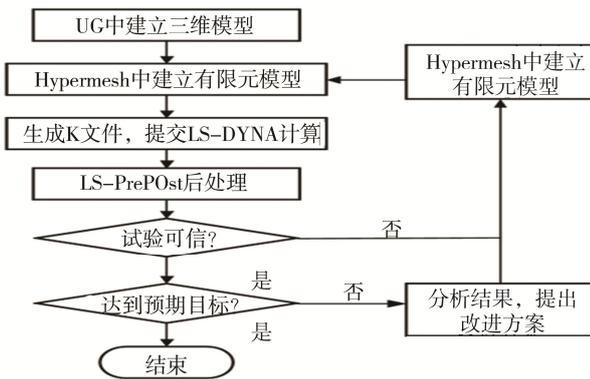


图1 分析流程  
Fig.1 Analysis process

### 2 软件介绍

#### 2.1 Hypermesh

Hypermesh 是一款高性能的有限元前处理平台,能够建立各种复杂模型的有限元和有限差分模型,与多重CAD和CAE软件有良好的接口并具有高效的网格划分功能。CAE工程师可借助Hypermesh在高度交互的环境下进行仿真分析<sup>[9]</sup>。相比于其他前处理软件,模型导入质量与效率都很高。Hypermesh具有很强的网格划分能力,有着良好的速度、适应性及可定制性<sup>[10]</sup>。

#### 2.2 Ansys/LS-DYNA

LS-DYNA软件经过不断的扩充和改进,成为著名的非线性动力分析软件。它以显示求解为主,同时

兼顾隐式求解功能,显示算法和隐式算法对比见图2。LS-DYNA可用于模拟各种复杂的大位移、大转动和大应变等问题,在汽车工业、航空工业、制造业、国防工业等领域应用广泛<sup>[11]</sup>。通过Ansys/LS-DYNA中提供的跌落测试模块DTM,可以很方便地进行产品的跌落测试分析。

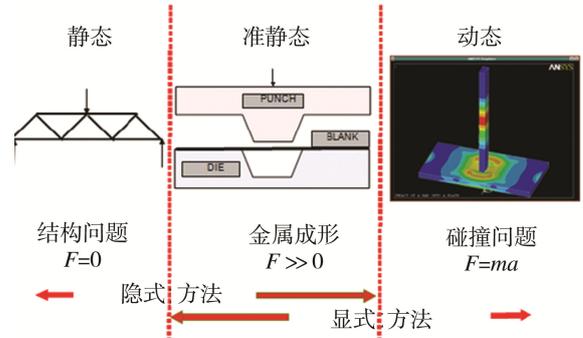


图2 显示和隐式方法对比  
Fig.2 Comparison of display and implicit methods

### 2.3 显示算法介绍

LS-DYNA包含Lagrange算法和Euler算法。在Lagrange算法中,单元网格形状随着材料的流动而发生改变<sup>[12]</sup>。在结构变形过于巨大时,有可能使有限元网格造成严重畸变<sup>[13]</sup>,引起数值计算困难。ALE算法和Euler算法可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难。Ansys/LS-DYNA显示时间积分采用中心差分法, $n$ 个时间步结束后加速度的计算为:

$$a(t_n) = M^{-1} [P(t_n) + F_{int}(t_n)] \tag{1}$$

式中: $M$ 为质量矩阵; $P$ 为第 $n$ 个时间步内所施加的节点外力向量; $F_{int}$ 为 $t_n$ 时刻的内力矢量<sup>[14]</sup>。

LS-DYNA用的显式中心差分算法只有在时间步小于临界时间步时稳定。LS-DYNA软件自动计算临界时间步的尺寸,且由单元特征长度和材料特性2个因素决定<sup>[15]</sup>。LS-DYNA中时间步长计算为:

$$t_e = \frac{L_s}{c} \tag{2}$$

式中小时间步长 $t_e$ 与单元特征长度 $L_s$ 成线性正比例关系: $t_e$ 为最小时间步长; $L_s$ 为单元特征长度; $c$ 为冲击波在材料中的传递速度。由式(2)可知,仿真计算的最小时间步长 $t_e$ 与单元特征长度 $L_s$ 成线性正比例关系<sup>[16]</sup>。

### 3 建立模型

#### 3.1 建立三维模型

与Hypermesh和Ansys软件相比,UG具有更好的三维建模功能,故文中选用UG软件作为实体三维几何建模工具,根据修枝机各个部件的形状及装配关系,建立修枝机整体三维模型,见图3。

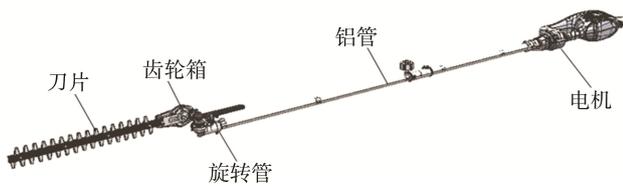


图 3 修枝机整机三维模型  
Fig.3 3D model of pruning machine

### 3.2 有限元模型与网格化

修枝机整机由 200 多个零件装配而成,为了减少工作量,鉴于修枝机形状的复杂性,依据圣维南局部作用原理对非关键部位结构模型进行简化,关键部位结构的特征全部保留。略去对计算结果影响不大的结构尺寸,如修枝机中的一些圆角、螺母等;齿轮箱、电机等部件内部的零件采用等效质量方法分摊到简化的外壳上。在 Hypermesh 中简化的有限元模型见图 4。根据模型特点,在 Hypermesh 中对跌落模型进行网格划分,有限元网格模型网格单元划分为 576 493 个,节点 164 851 个。



图 4 修枝机有限元模型  
Fig.4 Finite element model of pruning machine

### 3.3 设定材料

修枝机中旋转管部件采用 ZL104 铝合金材料,电机外壳体采用 ABS 塑料,其余大部分结构采用普通结构钢材料。具体材料参数见表 1。

表 1 材料主要参数  
Tab.1 Main material parameters

材料	密度 (/kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 (/MPa)	泊松比	屈服应力 (/MPa)
ZL104 铝合金	2700	70	0.3	380
ABS 塑料	1020	2	0.3	125
结构钢	7830	207	0.3	350
地面	2750	27	0.19	/

## 4 跌落仿真分析

### 4.1 跌落姿态

修枝机在跌落过程中,其跌落高度和跌落角度是影响跌落冲击的主要参数。跌落高度  $h$  设置为修枝机最低点距离地面高度( $0\text{ m} \leq h \leq 1\text{ m}$ ),修枝机轴线与水平面所成的角为  $\beta$  ( $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ ) 作为跌落角。为减少仿真计算时间,设置修枝机模型相距地面较短距离为  $h_0$ ,则修枝机跌落初速度  $v$  的计算为:

$$v = \sqrt{2g(h-h_0)} \quad (3)$$

修枝机侧向旋转跌落的角速度  $\omega$  的计算为:

$$v = \omega \cdot r \quad (4)$$

由实际使用情况可知,修枝机 2 种跌落极限工况分别为水平跌落( $h=1\text{ m}$ ,  $\beta=0^\circ$ )和竖直侧向跌落( $h=0\text{ m}$ ,  $\beta=90^\circ$ ),见图 5。

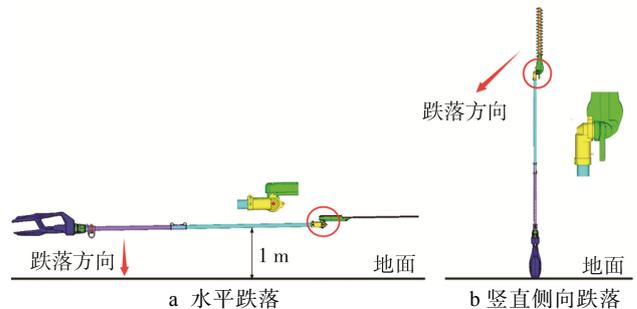


图 5 跌落姿态  
Fig.5 Drop pose

### 4.2 仿真试验

将地面固定约束,在  $x$  方向施加重力加速度  $g=9806.6\text{ mm/s}^2$ ,使修枝机模型分别在 2 种不同工况下进行跌落仿真试验。

#### 4.2.1 水平跌落

首先建立水平跌落求解时间卡片,依次选择菜单 Tools>CreateCards>CONTROL>CONTROL\_TERMINATION,在[ENDTM]下输入 0.05。然后建立质量缩放卡片,依次选择菜单 Tools>Create Cards>\*CONTROL>CONTROL\_TIMESTEP,在[DT2MS]下输入-1.2e-7,在[TFFAC]下输入 0.9。在 LS-DYNA 中进行仿真运算,在 LS-PrePost 中观察仿真结果。可知修枝机在水平跌落时,最大应力出现在 0.01 s,此时应力分布情况见图 6,发现在旋转管的转弯处发生应力集中现象,应力最大处为旋转管上的 129 146 号单元,该单元的应力-时间曲线见图 7a,可知修枝机在跌落过程中最大应力值为 655.267 MPa,远大于材料屈服强度,说明在该工况下旋转管在弯折处发生破裂,这与实际情况十分吻合,验证了有限元模型的正确性,因此可以应用该模型对竖直侧向跌落的工况进行仿真分析。此外,129 146 单元应变-时间曲线见图 7b,可知修枝机在跌落过程中最大应变为 0.347 248%,旋转管加速度-时间曲线见图 8,可知旋转管最大加速度为  $6.509\ 79 \times 10^6\text{ mm/s}$ 。

#### 4.2.2 竖直侧向跌落

首先建立竖直侧向跌落求解时间卡片,依次选择菜单 Tools>Create Cards>CONTROL>CONTROL\_TERMINATION,在[ENDTM]下输入 0.1。然后建立质量缩放卡片,依次选择菜单 Tools>Create Cards>\*CONTROL>CONTROL\_TIMESTEP,在[DT2MS]下输

入-1.2e-7,在[TFFAC]下输入0.9。在LS-DYNA中进行仿真运算,在LS-PrePost中观察仿真结果。可知修枝机在竖直侧向跌落时,最大应力出现在0.012s,此时应力分布情况见图9,发现在旋转管与地面接触位

置发生应力集中现象,应力最大处为接触位置的141313号单元,该单元的应力-时间和应变-时间曲线见图10,可知修枝机在跌落过程中最大应力值为771.653MPa,最大应变为1.45256%,旋转管加速度-时间曲线见图11,可知旋转管最大加速度为 $1.5077 \times 10^6 \text{ mm/s}^2$ 。

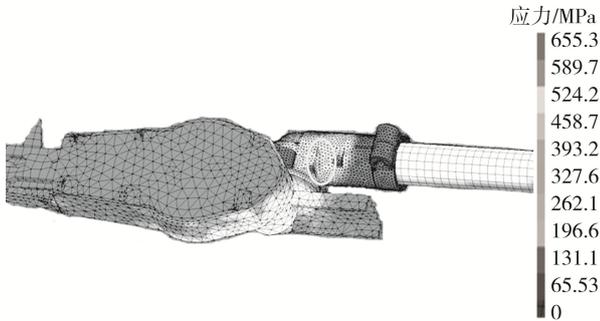


图6 水平跌落应力分布  
Fig.6 Horizontal stress distribution

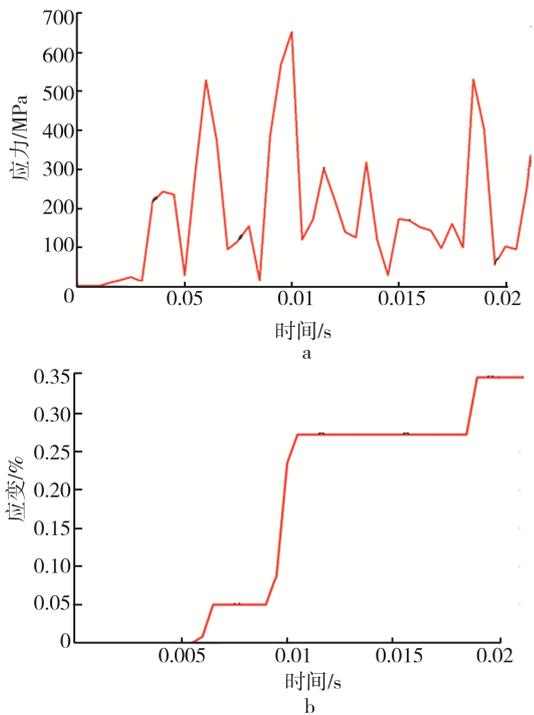


图7 129146单元的应力-时间和应变-时间曲线  
Fig.7 129146 element stress-time and strain-time curves

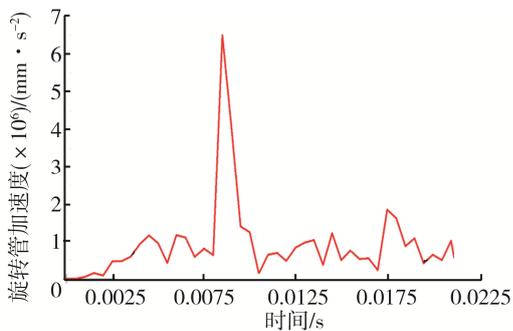


图8 水平跌落旋转管加速度-时间曲线  
Fig.8 Acceleration-time curve of horizontal drop rotating tube

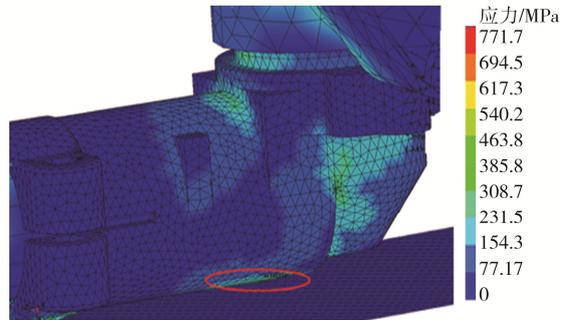


图9 竖直跌落应力分布  
Fig.9 Vertical drop stress distribution

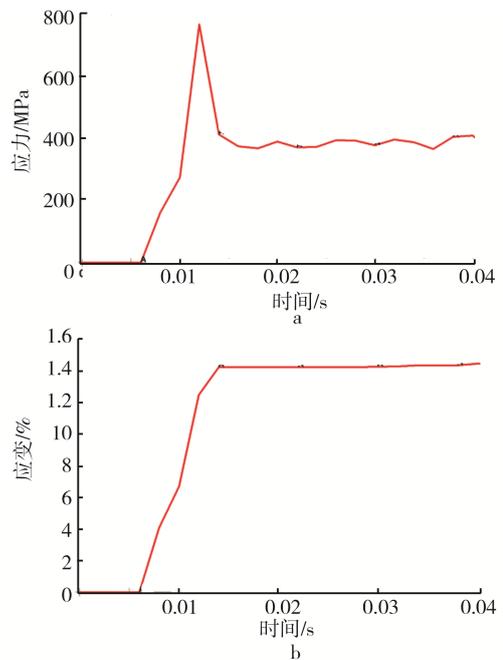


图10 141313单元应力-时间和应变-时间曲线  
Fig.10 141313 element stress-time and strain-time curve

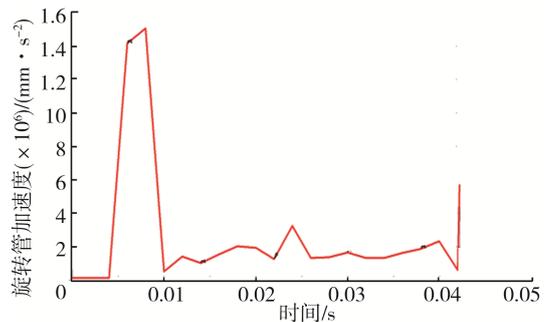


图11 竖直跌落旋转管加速度-时间曲线  
Fig.11 Acceleration-time curve of vertical drop rotating tube

### 4.3 结果分析

由仿真试验结果可知,水平跌落时修枝机的最大应力和最大应变均比竖直侧向跌落时的小,而水平跌落时旋转管的最大加速度比竖直侧向跌落时的大,这与修枝机跌落高度和跌落角度有关。修枝机在水平跌落和竖直侧向跌落 2 种工况下均在旋转管部位发生应力集中现象,2 种工况下修枝机最大应力分别为 655.267 和 771.653 MPa,均远超过材料屈服强度。说明 2 种工况下旋转管均发生破坏,是修枝机的薄弱部位,其质量将直接影响修枝机的整机使用性能。

### 5 结语

通过 LS-DYNA 对修枝机水平跌落过程进行仿真分析,验证了有限元模型的正确性。据此,再对修枝机竖直侧向跌落过程进行仿真分析,发现在 2 种极限工况下修枝机的易损部件为旋转管。旋转管的破坏会大大影响修枝机的使用性能,缩短修枝机的使用寿命。在今后的产品设计中,要着重对旋转管的结构进行优化设计。此外,在修枝机的运输搬运过程中也要对旋转管部件进行保护,着重针对旋转管部件来设计合理的缓冲包装结构。

### 参考文献:

- [1] 郝智伟, 钱静. 洗衣机关键部件的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 27—29.  
HAO Zhi-wei, QIAN Jing. Simulation and Analysis of Key Components of Washing Machine[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 27—29.
- [2] 张云华. 手持式红外热像仪包装件跌落冲击动力学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.  
ZHANG Yun-hua. Study on the Drop Impact Dynamics of the Hand-held Infrared Thermal Imager[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [3] 王俊丽, 陈喜春. 缓冲包装的跌落仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(9): 8—10.  
WANG Jun-li, CHEN Xi-chun. Simulation of Cushioning Package Drop Simulation[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9): 8—10.
- [4] 华丽, 钱静. 洗衣机运输包装件的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 61—62.  
HUA Li, QIAN Jing. Drop Simulation Analysis of Washing Machine Transport Package[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 61—62.
- [5] 巩雪, 常江, 孙智慧. 高脚杯缓冲包装力学性能有限元分析[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 50—53.  
GONG Xue, CHANG Jiang, SUN Zhi-hui. A Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Cushioning Packaging[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 50—53.
- [6] 杨书仪. 产品跌落冲击动力学分析与耐撞性能稳健设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.  
YANG Shu-yi. Dynamic Analysis of Product Drop Impact and Robust Design of Anti Impact Performance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [7] 莫立权. 车架正面碰撞性能 CAE 分析与改进[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.  
MO Li-quan. Analysis and Improvement of Frame Front Impact Performance of CAE[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [8] 王若平, 陈豫. 基于 LS-dyna 和 HyperWorks 的大客车正面碰撞仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(3): 419—422.  
WANG Ruo-ping, CHEN Yu. Simulation and Analysis of Frontal Impact of Bus Based on LS-dyna and HyperWorks[J]. Mechanical Science and Technology, 2014, 33(3): 419—422.
- [9] 于开平, 周传月, 谭惠丰. HyperMesh 从入门到精通[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
YU Kai-ping, ZHOU Chuan-yue, TAN Hui-feng. HyperMesh from Entry to the Master[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [10] 王向领. 面向精冲数值模拟的自适应四边形网格生成的关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
WANG Xiang-ling. Adaptive Quadrilateral Mesh Generation in the Numerical Simulation of Fine Blanking the Key Technology Research[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [11] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 天津: 兵器工业出版社, 2003.  
ZHAO Hai-ou. LS-DYNA Dynamic Analysis Guide[M]. Tianjin: Weapon Industry Press, 2003.
- [12] 庄新炉. 爆炸载荷作用下裂隙岩体的损伤特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2005.  
ZHUANG Xin-lu. Study on the Damage Characteristics of Fractured Rock under Explosion Load[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2005.
- [13] 李文贺. 舰船水下爆炸冲击波载荷作用下动力响应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
LI Wen-he. Study on Dynamic Response of Underwater Explosion Shock Wave of Warship[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [14] 朱超, 费国胜, 朱留宪. 基于 LS-DYNA 屏蔽转运容器的跌落仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2015(1): 36—37.  
ZHU Chao, FEI Guo-sheng, ZHU Liu-xian. Simulation and Analysis of the Drop Simulation of Transport Vessels Based on LS-DYNA Shield[J]. Mechanical Research and Application, 2015(1): 36—37.
- [15] 苏建. 汽车前纵梁结构的碰撞仿真及其优化[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.  
SU Jian. Collision Simulation and Optimization of Automobile Front Rail Structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [16] 邹正宽. 汽车前纵梁结构耐撞性设计与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
ZOU Zheng-kuan. Automobile Front Rail Crashworthiness Design and Application[D]. Changsha: Hunan University, 2010.