

## 重装空投货物出舱姿态变化过程数值分析

王宏<sup>1</sup>, 杨贞文<sup>1</sup>, 赵西友<sup>1</sup>, 刘胜祥<sup>2</sup>

(1.空军空降兵学院, 桂林 541003, 2.湖南华望科技股份有限公司, 湖南 410215)

**摘要:** **目的** 研究空投货物出舱姿态变化过程, 为确定最佳的捆绑货物重心位置提供依据。**方法** 基于 Ansys/LS-DYNA 软件平台, 以某型重装空投系统为例, 采用数值模拟的方法研究不同情况下货物出舱姿态的微观变化过程, 包括翻转角度和翻转速度随时间的变化情况, 从而确定出最佳的捆绑货物重心位置。**结果** 对出舱速度为 1 m/s 时不同重心位置货物的翻转过程进行了数值分析, 确定了该速度下最佳捆绑货物的重心位置。**结论** 捆绑货物重心位置对货物的出舱姿态有明显影响。采用数值模拟的方法对空投货物出舱姿态变化过程进行分析, 能够得出逼近实际且较为精确的解。

**关键词:** 重装空投; 出舱姿态; 数值分析

**中图分类号:** TP302.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)17-0015-05

## Numerical Analysis on the Changing Process of Heavy Equipment Airdrop Cargo Extraction Posture

WANG Hong<sup>1</sup>, YANG Zhen-wen<sup>1</sup>, ZHAO Xi-you<sup>1</sup>, LIU Sheng-xiang<sup>2</sup>

(1. Air Force Airborne Academy, Guilin 541003, China; 2. Hunan Huawang Technology Co., Ltd., Changsha 410215, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the changing process of airdrop cargo extraction posture and provide references to determine the best binding part of the gravity center position of cargo. Based on the Ansys/LS-DYNA software platform and with a certain type of heavy equipment airdrop system as example, the microcosmic changing process of cargo extraction posture in different situations was researched by numerical analysis method, including the change of turn-over angle and turn-over speed as time changes. Then the best binding part of the gravity center position of cargo was determined. The numerical analysis was done on the turn-over process of cargo with different gravity center positions at the extraction speed of 1 m/s, and the best binding part of the gravity center position of cargo was determined. In conclusion, the binding part of the gravity center position of cargo has a significant influence on the cargo extraction posture. Analysis of the changing process of airdrop cargo extraction posture by numerical simulation method can get accurate and close-to-actual solutions.

**KEY WORDS:** heavy equipment airdrop; extraction posture; numerical analysis

重装空投技术的发展历来受到世界各国的高度重视。中国自引进该项技术以来, 历经十多年的发展已日趋成熟, 但是与世界先进水平相比还有一定的差距, 主要体现在空投能力和方式上。制约中国重装空投技术发展的因素是多方面的, 其中缺乏有效的实验手段就是因素之一, 对货物的捆绑、系

留方案基本停留在依赖经验的基础上。这样不仅浪费大量的人力物力, 而且有可能对货物造成损坏, 因此, 有必要对这一问题进行研究。文中基于 Ansys/LS-DYNA 数值模拟与分析系统<sup>[1-4]</sup>, 针对某型重装空投系统, 对其货物出舱姿态变化过程进行模拟分析, 以货物翻转速度和翻转角度作为衡量

收稿日期: 2016-06-07

作者简介: 王宏 (1967—), 男, 山西临猗人, 博士, 空军空降兵学院教授, 主要研究方向为空降空投技术。

标准<sup>[5]</sup>, 确定出 1 m/s 出舱速度下最佳的货物捆绑重心位置, 从而为重装空投系统的设计和实际空投时的捆绑、系留操作提供理论依据<sup>[6]</sup>。

## 1 计算仿真模型的建立

### 1.1 模拟对象

文中针对某型重装空投系统, 模拟研究空投重型设备时, 货物离开机舱到主伞绳完全拉直的一段时间内, 货物在 1 m/s 的出舱速度下, 重心位置与货物的最大翻转角度和翻转速度之间的关系<sup>[7-8]</sup>。重装空投系统总体上由货台和降落伞组成, 货台是货物的载体, 这里笔者将货物及货台视为长方体整体, 规格为 3.65 m×2.4 m×2 m, 机舱地板视为 4 m×2.4 m×0.2 m 的长方体。

考虑到空投过程的特点及数值分析的主要目的, 为降低模拟难度, 减少计算时间, 对空投模拟作了以下几点简化<sup>[9-12]</sup>: 货物出舱时间取从货台几何中心到达机舱边缘起, 到主伞绳拉直为止, 此段时间不超过 3 s, 因此, 模拟时间确定为 3 s; 飞机空投时保持水平飞行, 飞机货舱地板水平; 将货物及货台视为一整体, 用长方体代替实际模型, 不考虑系留问题; 将飞机视为静止, 货台及货物以相对于飞机 1 m/s 的速度出舱。在上述假设的基础上, 对货物出舱的姿态变化过程进行模拟, 找出重心位置与翻转角度的关系。根据实际空投经验选定了 3 种不同的重心位置, 进行了 3 种工况的仿真计算, 以寻求最佳的捆绑货物重心位置。重心  $y, z$  坐标为此方向上模型的几何中心, 工况 1、工况 2、工况 3 的重心  $x$  坐标分别为 2.3053, 2.2093, 2.1132 m。

### 1.2 结构模型

根据机舱的构造、重装空投系统的构成、各部分的几何尺寸、模拟条件的假设以及空投时货物出舱的实际过程<sup>[13-15]</sup>, 确定了空投货物出舱姿态变化过程模拟分析结构模型(侧视图), 见图 1。并在此基础上进行了货台货物和机舱地板的有限元网格划分, 见图 2。

### 1.3 物理条件的定义

为完整描述整个货台货物出舱过程, 对材料参数、接触面、边界条件等物理条件作如下定义。

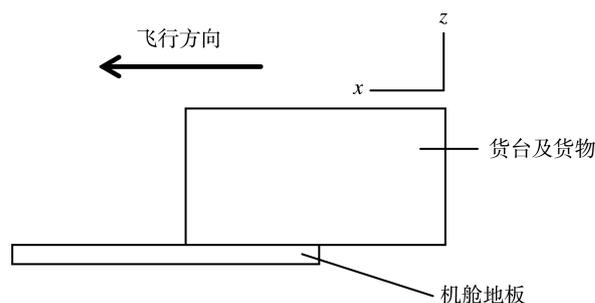


图 1 空投货物出舱姿态模拟分析结构模型

Fig.1 Construction model of simulation analysis on airdrop cargo extraction posture

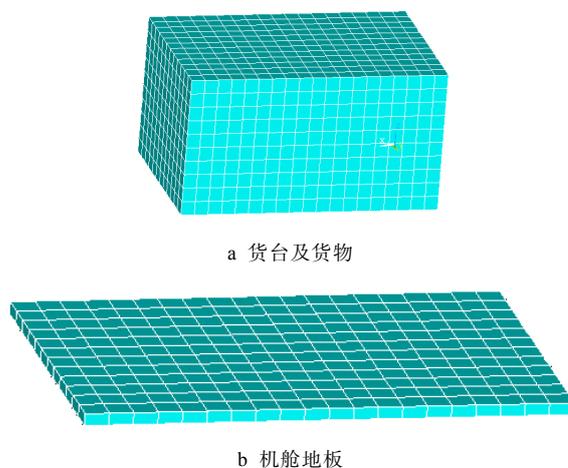


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model of platform, cargo and cabin floor

1) 材料参数的定义。机舱地板和货台货物均定义为线弹性材料, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 机舱地板密度为 7800 kg/m<sup>3</sup>, 货物的密度由货物的质量与体积求得, 为 475 kg/m<sup>3</sup>。

2) 接触定义。接触-碰撞问题属于最困难的非线性问题之一, 因为在接触-碰撞问题中的响应是不平滑的。当发生碰撞时, 垂直于接触界面的速度是瞬时不连续的。对于 Coulcomb 摩擦模型, 当出现粘性滑移行为时, 沿界面的切向速度也是不连续的。接触-碰撞问题的这些特点给离散方程的时间积分带来明显困难, 因此, 方法和算法的适当选择对于数值分析的成功是至关重要的。在文中的模拟分析中, 货台与机舱地板存在接触对的问题。针对货台在机舱内滑移的特点, 将这个接触定义为可分离的自动面接触模型。

3) 初始及边界条件定义。货台及货物受 81 340 N 的重力, 重力加到重心位置; 货台及货物出舱速度设为 1 m/s; 机舱地板  $x, y, z$  方向的位移及转动自由度都受约束。

## 2 结果及分析

通过数值计算模拟，利用动画直观显示了各种工况下货台及货物的出舱过程，得到了出舱过程中货台及货物的各种参数。通过比较 3 s 内 807 和 808 节点的  $z$  方向位移差随时间的变化曲线，即可知货物的翻转情况见图 3。由于 807 和 808 节点距离为 3.65 m，若两点位移差达到峰值 3.65 m，表示货物翻转达到竖起方向，如果 3 s 内位移差曲线的峰值没有达到 3.65 m，即表示货物在 3 s 内翻转角度小于  $90^\circ$ ，3 s 内峰值越小翻转角度越小。

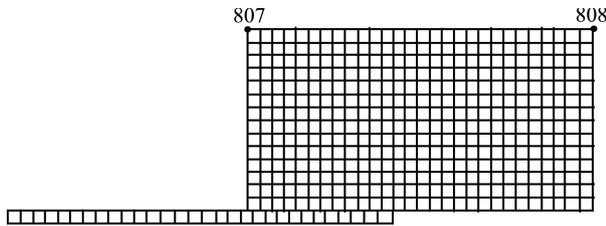


图 3 807 和 808 节点位移  
Fig.3 Diagram of nodes 807 and 808

### 2.1 工况 1 时货物姿态变化过程分析

重心位置  $x=2.3053$  m 即工况 1 时，807 和 808 节点  $z$  方向位移和位移差曲线见图 4。从图 4 中可以看出，0.5 s 之前货台货物基本处于平稳状态，0.5 s 后开始向右翻转，之后翻转角度越来越大，

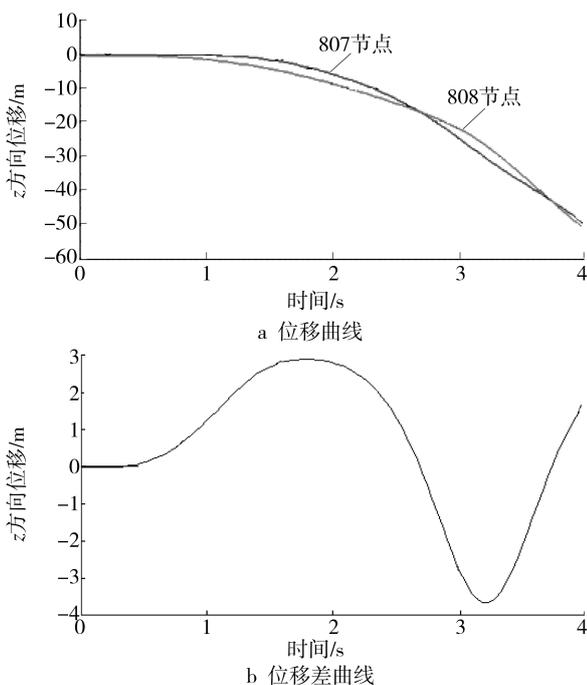


图 4 工况 1 时 807 和 808 节点  $z$  方向位移和位移差曲线  
Fig.4 Displacement curve and displacement deviation curve of nodes 807 and 808 in  $z$  direction under working condition 1

但总体较为平缓，在 1.8 s 左右翻转角度达到最大，但没有达到竖直方向，之后开始向左翻转，且翻转速度明显加快，在 3.4 s 左右达到竖直方向。

### 2.2 工况 2 时货物姿态变化过程分析

重心  $x=2.2093$  m 即工况 2 时，807 和 808 节点  $z$  方向位移和位移差曲线见图 5。从 5 中可以看出，0.5 s 之前货台货物基本处于平稳状态，0.5 s 后开始向右翻转，之后翻转角度越来越大，在 2 s 左右翻转角度达到最大，但没有达到竖直方向，之后开始向左翻转，在 3.5 s 左右达到竖直方向。

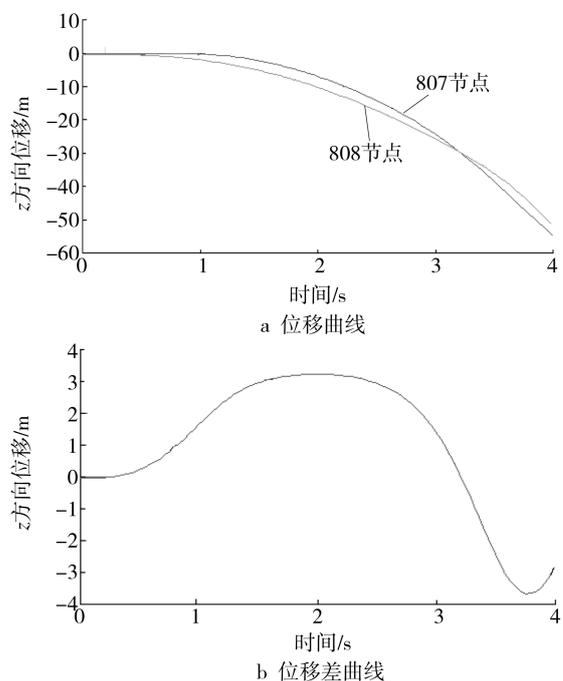


图 5 工况 2 时 807 和 808 节点  $z$  方向位移和位移差曲线  
Fig.5 Displacement curve and displacement deviation curve of nodes 807 and 808 in  $z$  direction under working condition 2

### 2.3 工况 3 时货物姿态变化过程分析

重心  $x=2.1132$  m 即工况 3 时，807 和 808 节点  $z$  方向位移和位移差曲线见图 6。从图 6 中可以看出，0.2 s 之前货台货物基本处于平稳状态，0.2 s 后开始向右翻转，之后翻转角度越来越大，在 2.6 s 左右翻转角度达到最大，达到了竖直方向，之后开始向左翻转，直至达到平稳状态。

从以上 3 种工况的分析结果来看，3 种工况一开始货物都是向右翻转。工况 1 时开始货物翻转速度较慢，但 2 s 后翻转速度明显加快，虽然前 3 s 内货物未达到  $90^\circ$ ，但时间稍为延长就会向左急速转至竖直方向；工况 2 时货物翻转速度明显比工

况1要慢,但也是在向左翻转后达到竖直方向;工况3时前2 s货物翻转速度与工况2相近,后1 s翻转比工况2更为平缓,且不存在大幅向左翻转的情况。综合以上分析,1 m/s的出舱速度时,重心位置取在工况3的位置比较好。

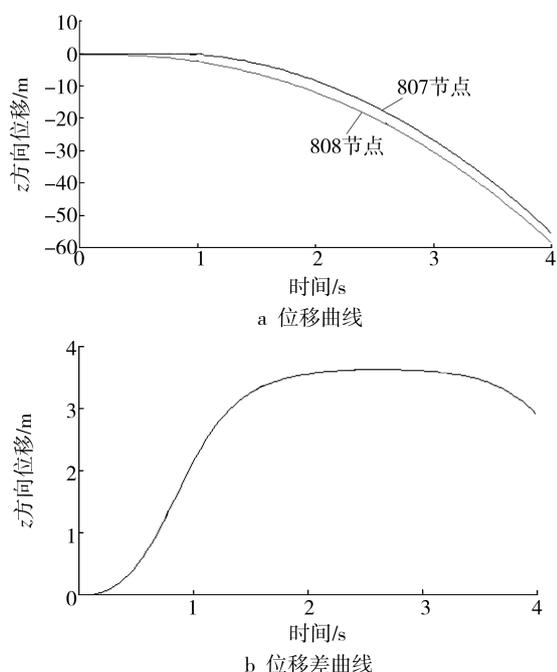


图6 工况3时807和808节点 $z$ 方向位移和位移差曲线  
Fig.6 Displacement curve and displacement deviation curve of nodes 807 and 808 in  $z$  direction under working condition 3

### 3 结语

通过文中数值模拟分析,得到了货物以1 m/s的速度出舱时,不同的重心位置下货物翻转情况随时间的变化曲线。从分析结果可以看出,货物捆绑的重心位置对货物出舱后的翻转速度和角度具有比较明显的影响,决定了货物出舱的平稳状态。对文中研究的某型重装空投系统来说,其最佳的货物重心位置在 $x=2.1132$  m,这与实际空投时货物翻转的监测结果基本一致,证明了数值模拟计算方法的使用能够为研究空投重型装备时如何控制货物重心提供一定的理论指导,同时也验证了数值模拟方法在该领域应用的可行性。

#### 参考文献:

[1] 李良春,黄刚,李文生,等. 基于 Ansys/LS-DYNA 的新型着陆缓冲气囊仿真分析[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 16—20.

- LI Liang-chun, HUANG Gang, LI Wen-sheng, et al. Simulation Analysis of New Type Landing Cushion Airbag Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 16—20.
- [2] 张改梅, 仵季红, 郭福宾. 基于 Ansys/LS-DYNA 的易拉罐跌落研究[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 4—6.  
ZHANG Gai-mei, WU Ji-hong, GUO Fu-bin. Drop Analysis of Pop Can Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 4—6.
- [3] 齐明思, 刘守君, 赵奇, 等. 基于 Ansys/LS-DYNA 的缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 13—17.  
QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research of the Cushioning Airbag during the Landing Process Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 13—17.
- [4] 谭军, 韩旭, 刘鑫. 某特种车空投着陆过程数值仿真分析与改进[J]. 包装工程, 2010, 31(1): 57—61.  
TAN Jun, HAN Xu, LIU Xin. Numerical Analysis and Improvement of Airdrop Landing Process of Special Vehicles[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1): 57—61.
- [5] 李大东, 孙秀霞, 董文瀚, 等. 考虑多种影响因素下的改进重装空投系统建模[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(2): 447—451.  
LI Da-dong, SUN Xiu-xia, DONG Wen-han, et al. Improved Heavy-weight Airdrop Model Considering Many Influence Factors[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(2): 447—451.
- [6] 丁毅, 王嘉宁, 贾向丽. 重装备空投系统的缓冲包装设计[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 96—97.  
DING Yi, WANG Jia-ning, JIA Xiang-li. Cushion Design of Air Drop System for Heavy Equipment[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 96—97.
- [7] 张恒铭, 程德峰, 惠笃义. 重装空投中影响货物最大翻转角的因素分析[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(3): 37—40.  
ZHANG Heng-ming, CHENG De-feng, HUI Du-yi. Influences Factors of the Cargo Overturn during Air-drope[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2014, 35(3): 37—40.
- [8] 张恒铭, 程德峰. 重装空投中货物重心位置对离机姿态角的影响分析[J]. 航空科学技术, 2013(5): 27—29.  
ZHANG Heng-ming, CHENG De-feng. Influences of the Barycenter Position on Pose Angle during Airdrop[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013(5): 27—29.
- [9] 冯艳丽, 史忠科. 超低空空投货物出舱过程的动态逆鲁棒控制[J]. 控制工程, 2010, 17(5): 580—586.

- FENG Yan-li, SHI Zhong-ke. Robust Dynamic Inversion Control of Cargo Extraction during Airdrop at Super Low Attitude[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(5): 580—586.
- [10] 王亚伟, 杨春信, 柯鹏, 等. 货物空投系统自动脱离锁成功脱离概率分析[J]. 航空学报, 2010, 31(2): 265—270.
- WANG Ya-wei, YANG Chun-xin, KE Peng, et al. Probability Analysis on Parachute Groud Release for Cargo Airdrop Sysem[J]. Acta Aernautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2): 265—270.
- [11] CHEN J, SHI Z K. Flight Control Design of Transport Airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 600—605.
- [12] ZHANG H Y, SHI Z K. Variable Structure Control of Catastrophic Course in Airdropping Heavy Cargo[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 520—527.
- [13] 马骏, 孙秀霞, 董文瀚. 基于 JSBSim 的运输机重装空投飞行仿真系统[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(10): 65—68.
- MA Jun, SUN Xiu-xia, DONG Wen-han. Flight Simulation System for Transport Aircraft Heavyweight Airdrop Based on JSBSim[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(10): 65—68.
- [14] 张恒铭, 王丹, 张永吉. 超低空重装空投中货物运动对飞机的影响分析[J]. 航空科学技术, 2014(12): 39—43.
- ZHANG Heng-ming, WANG Dan, ZHANG Yong-ji. Cargo Movement Influences Analysis on the Airplane During Low Altitude Heavy Equipment Airdrop[J]. Aeronautical Science and Technology, 2014(12): 39—43.
- [15] CHEN J, SHI Z K. Aircraft Modeling and Simulation with Cargo Moving Inside[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 191—197.