

文章编号:1674-8190(2022)01-068-08

# 不同地面条件重装空投气囊着陆缓冲过程数值分析

连伟欣<sup>1</sup>, 侯斌<sup>1</sup>, 孙建红<sup>1,2</sup>, 王从磊<sup>2,3</sup>, 张彤<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部实验室, 南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 宏光空降空投联合技术中心, 南京 210016)

(3. 航空工业宏光空降装备有限公司, 南京 210022)

**摘要:** 刚性地面假设的重型装备空投的数值结果无法准确模拟空投的着陆姿态, 需使用土壤地面对空投的缓冲性能进行研究。使用LS-DYNA有限元仿真软件对土壤地面和刚性地面对空投的着陆缓冲性能进行对比, 研究刚性地面的适用条件; 并研究土壤地面下不同横向风速对空投着陆缓冲性能的影响。结果表明: 空投垂直冲击地面时, 两种地面下货物的最大过载差异很小, 而在横风条件下前倾冲击时过载差异很大, 故在横风条件下需采用土壤地面进行数值分析; 土壤地面下横向风速、初始竖向速度越大, 竖向峰值过载越大。

**关键词:** 空投系统; 土壤模型; 缓冲气囊; 有限元; 土壤变形

中图分类号: V244.21

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.01.07

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Numerical Analyses of Heavy Equipment Airdrop with Cushion Airbag Landing Process Impacting the Rigid and Soil Ground

LIAN Weixin<sup>1</sup>, HOU Bin<sup>1</sup>, SUN Jianhong<sup>1,2</sup>, WANG Conglei<sup>2,3</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Hongguang Airdrop United Technology Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(3. AVIC Hongguang Airborne Equipment Company, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** The numerical results of heavy equipment airdrop based on rigid ground assumption cannot accurately simulate the landing attitude of airdrop, so it is necessary to study the cushioning performance of airdrop under soil ground. In order to study the suitable condition of rigid ground, the LS-DYNA software is used to simulate the landing process, and to compare the performance of the airdrop system under the rigid and soil ground. Meanwhile, the effect of different lateral wind velocities on the airdrop impact performance is analyzed. The results show that the difference of the maximum overload of the cargo is very small between the case of the rigid and the soil ground when the airdrop system only strikes the ground perpendicularly. The difference is much greater and the deformation effect of soil ground is significant under lateral wind conditions. Therefore, soil ground should be used for simulation with lateral wind. Under soil ground the larger of the lateral wind velocity and the initial vertical velocity, the larger of the vertical peak overload.

**Key words:** airdrop system; soil model; cushion airbag; finite element; soil deformation

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-20

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 孙建红, jhsun@nuaa.edu.cn

引用格式: 连伟欣, 侯斌, 孙建红, 等. 不同地面条件重装空投气囊着陆缓冲过程数值分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 68-75.

LIAN Weixin, HOU Bin, SUN Jianhong, et al. Numerical analyses of heavy equipment airdrop with cushion airbag landing process impacting the rigid and soil ground[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 68-75. (in Chinese)

## 0 引言

空投是指使用降落伞、制动火箭、缓冲气囊等装置将物资投放至指定位置的一种空中投送技术,具有精准安全等特点,在现代战争、军事演练及抗震救灾中应用广泛<sup>[1]</sup>。空投的工作过程一般分为:运输机引导伞拉出阶段、伞绳拉直阶段、主伞充气阶段、稳定下降阶段以及着陆缓冲阶段<sup>[2]</sup>。桂冰颖<sup>[3]</sup>研究了货物在牵引伞作用下沿舱内轨道滑动时对飞机姿态的影响,建立了机—货二体系系统动力学模型;张恒铭等<sup>[4]</sup>建立了货物连续出舱分析模型用于研究货物连续出舱对飞机姿态的影响;李智<sup>[5]</sup>针对运输机超低空空投时大气扰动现象提出了扰动补偿控制法;冯传奇等<sup>[6]</sup>采用任意拉格朗日—欧拉(Arbitrary Lagrange-Euler,简称ALE)有限元方法对某型重装空投降落伞的充气过程进行了研究;汤健华<sup>[2]</sup>建立了车载炮空投系统的主伞拉直、充气、稳定阶段的动力学模型;K. J. Desabrais等<sup>[7]</sup>对某型冲压空气降落伞进行了风洞和空投试验,建立了降落伞空气动力学性能与织物透气性之间的关系。目前国内外一般采用数值模拟的方法对空投的着陆缓冲性能进行研究。

国内外研究人员对不同着陆环境下空投着陆缓冲过程进行了大量数值研究。厉尚书<sup>[8]</sup>对空投鱼雷入水进行了数值模拟研究,探究了空投鱼雷材料、入水速度对空投鱼雷冲击响应的影响;赵庆新等<sup>[9]</sup>对波浪条件下空投自主式水下运载器低速入水进行了研究,指出波浪环境下运载器受力大于静水环境,同时还研究了波浪参数、风速、空投入水姿态对空投运载器入水冲击性能的影响;王一波等<sup>[10]</sup>使用控制体积法(Control Volume,简称CV)研究了小型电子设备着陆缓冲气囊冲击刚性地面的过程;唐晓慧等<sup>[11]</sup>在刚性地面假设下对空投系统气囊缓冲过程及货台与地面的碰撞过程进行了理论推导,探究了地面摩擦力对具有侧向速度的空投系统稳定性的影响;A. Taylor等<sup>[12]</sup>结合土壤地面探索了重装空投安全气囊冲击衰减系统的适用性;王新春<sup>[13]</sup>研究了横风干扰和着陆地面弹塑性对空投车载火箭炮着陆过程的影响,其所选用的地面模型为实砂土地面;吴磊<sup>[14]</sup>使用了包括粉土、强风化粉砂岩以及中风化砂岩在内的三

种地面材料对重型空投装备的着陆过程进行了分析;E. Fasanella等<sup>[15]</sup>开发了可用于外太空星球探测器着陆过程研究的软土有限元模型;Chen Jinbao等<sup>[16]</sup>研究了月球土壤变形对月球探测器着陆过程稳定性的影响。国内外针对超大型或者重型装备空投的数值研究一般基于刚性地面假设,这与空投复杂的工作环境不甚相符,国内外对复杂环境下空投着陆性能研究的需求越来越迫切,但这方面的研究并不充分。

基于对复杂环境下空投着陆性能的研究需求,本文针对不同着陆环境,重点研究弹塑性土壤地面和刚性地面下空投系统的冲击性能,分析土壤地面下不同速度对空投系统冲击性能的影响,以期为重装空投试验提供一定的理论参考和技术支撑。

## 1 计算方法与验证

### 1.1 计算方法

本文采用CV法<sup>[10]</sup>模拟空投系统中气囊的缓冲过程。假定囊内气体为理想气体且压力、温度均匀分布,并忽略气囊内外的热量交换。气囊内部气体方程:

$$\begin{cases} p=(k-1)\rho e \\ e_{i+1}/e_i=(V_i/V_{i+1})^{k-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p$ 为气囊内部气体压力; $\rho$ 为气囊内部气体密度; $e$ 为比内能; $V$ 为气囊体积;下标 $i$ 和 $i+1$ 表示气囊内部气体变化前后的状态; $k$ 为气体绝热常数。

土壤模型为ANSYS/LS-DYNA模块提供的MAT147(MAT\_FHWA\_SOIL)材料模型,同时采用该模块提供的接触算法<sup>[17-20]</sup>,该模型考虑了土壤的孔隙率应变硬化以及应变软化等问题。土壤模型的主要材料参数如表1所示。

表1 土壤模型的主要材料参数<sup>[17-18]</sup>  
Table 1 Material parameters of soil model<sup>[17-18]</sup>

参数	数值
土壤密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 350
体积模量/MPa	350
内摩擦角/rad	1.1
含水量/%	3.4

### 1.2 算例验证

采用文献[21]中缓冲气囊的室内跌落试验对仿真建模方法进行验证。配重平台质量为 435 kg, 网格大小为 0.02 m。气囊和地面均为壳单元, 刚性地面固定不动。

计算工况: 竖直着陆初速度为 6 m/s, 大气压力为 101.325 kPa, 气囊初始表压为 0.54 kPa。试验数据与仿真结果对比如图 1 所示, 可以看出: 过载峰值出现的时刻差异很小, 两条曲线趋势一致, 证明数值方法可以满足要求。

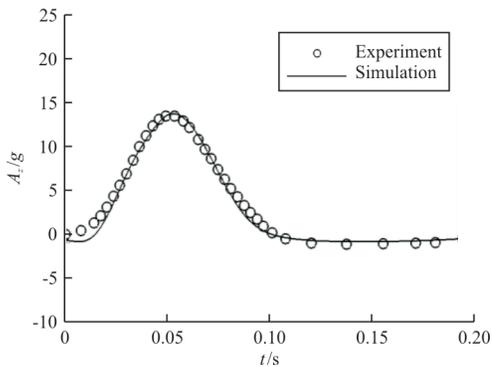


图 1 试验数据与仿真结果对比

Fig. 1 Experimental data and simulation results

## 2 地面条件对冲击性能的影响

### 2.1 计算模型

本文的空投系统结构示意图如图 2 所示, 其有限元模型如图 3(a) 所示, 刚性地面和土壤地面的有限元模型分别如图 3(b) 和图 3(c) 所示。土壤模型网格加密示意图如图 4 所示, 加密区域的网格大小为 0.04 m, 网格向其他方向渐疏, 土壤模型非撞击的五个表面的边界条件为无反射边界条件。货物的质量为 7 190 kg, 货台的质量为 1 500 kg, 货物和货台刚性连接。六个圆柱体气囊的上层黏合于各自对应的上、下垫板, 圆柱气囊周向均匀分布六个排气口, 位置如图 5 所示。

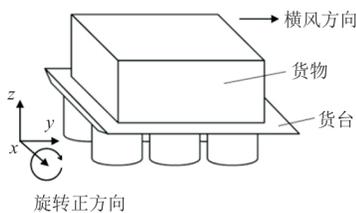
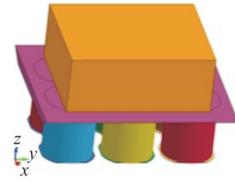


图 2 空投模型结构示意图

Fig. 2 Airdrop model



(a) 空投有限元模型



(b) 刚性地面有限元模型



(c) 土壤地面有限元模型

图 3 空投系统的有限元模型

Fig. 3 Finite element models of airdrop

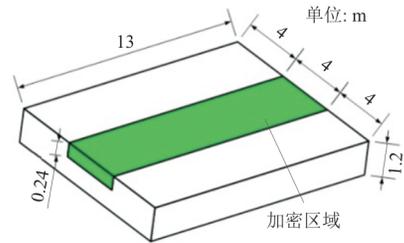


图 4 土壤模型网格加密示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid densification of soil model

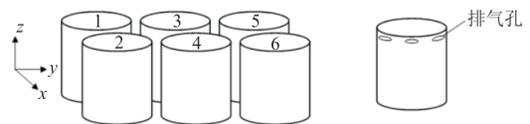


图 5 气囊编号及排气孔位置示意图

Fig. 5 Airbag number and vent position

### 2.2 地面模型与横风影响

首先选取刚性地面和土壤地面探究不同地面模型对空投系统着陆缓冲性能的影响。分两种工况对空投系统的缓冲性能进行研究, 具体分析工况如表 2 所示。

(1) 竖直着陆冲击: 空投系统着陆于地面, 竖直着陆速度  $v_z=8$  m/s, 无横风。

(2) 前倾着陆冲击: 空投系统着陆于地面, 竖直着陆速度  $v_z=8$  m/s, 横向风速  $v_y=4$  m/s, 方向为  $y$  轴正向。

表2 不同地面模型及工况列表  
Table 2 Working conditions list

Case	地面模型	空投着陆速度/( $m \cdot s^{-1}$ )
1	刚体	$v_z=8, v_y=0$
2	土壤	$v_z=8, v_y=0$
3	刚体	$v_z=8, v_y=4$
4	土壤	$v_z=8, v_y=4$

竖直着陆、前倾着陆冲击工况下,刚性地面模型与土壤地面模型不同时刻空投系统姿态对比如图6~图7所示。空投系统撞击地面的过程可分为气囊接地缓冲阶段、首次撞击地面阶段、首次回弹阶段、衰减撞击与回弹阶段、静止状态。

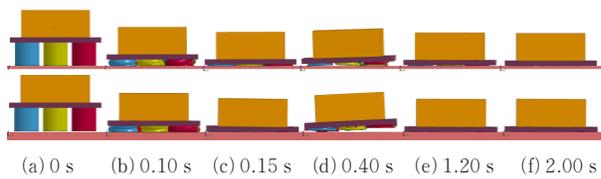


图6 竖直着陆冲击时刚体地面(上)与土壤地面(下)空投系统姿态对比  
Fig. 6 Vertical landing attitude comparison between rigid (upper) and soil ground(lower)

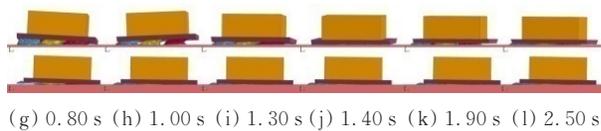
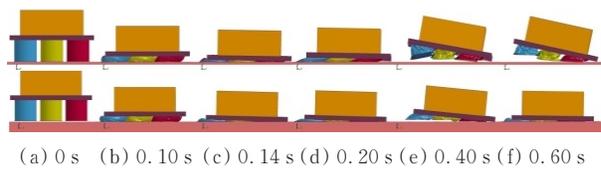


图7 前倾着陆冲击时刚体地面(上)与土壤地面(下)空投系统姿态对比  
Fig. 7 Forward landing attitude comparison between rigid (upper) and soil ground(lower)

两种地面模型下货物竖直方向过载对比及局部放大图如图8所示。两种地面模型下货物竖直方向速度对比及局部放大图如图9所示。两种地面模型下货物旋转角度(绕x轴顺时针旋转为正)和1号气囊压力对比图分别如图10~图11所示。

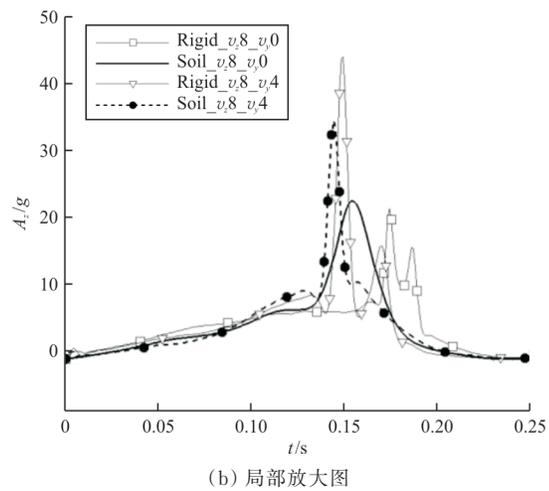
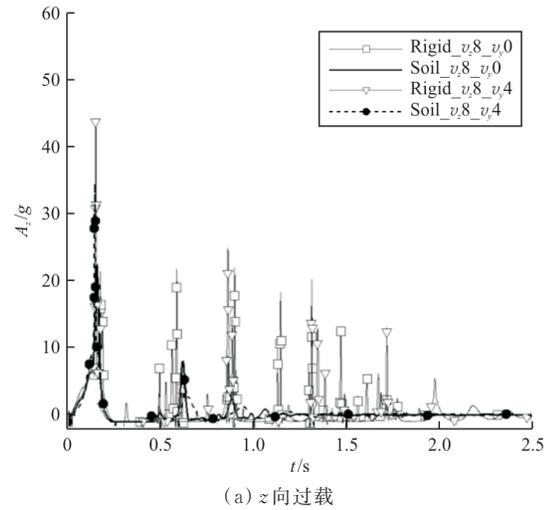
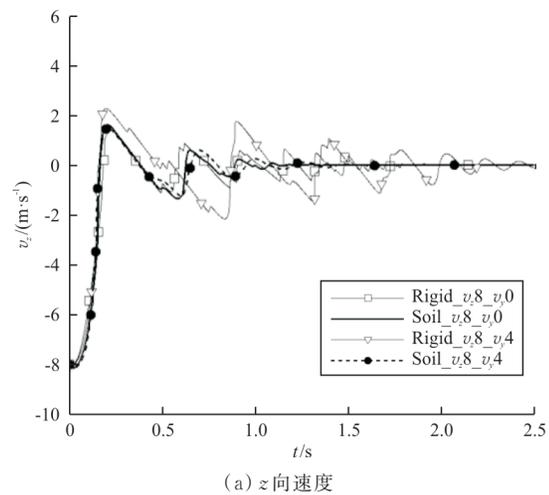


图8 两种地面状态下货物竖向过载对比  
Fig. 8 Vertical overload comparison of cargo between two ground model



(a) z向速度

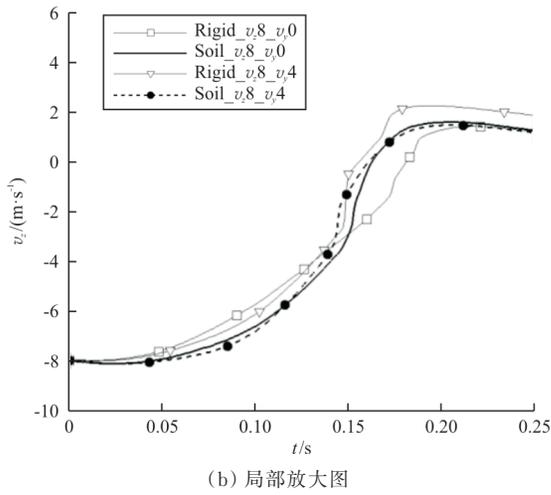


图 9 两种地面状态下货物竖向速度对比  
Fig. 9 Vertical velocity comparison of cargo between two ground model

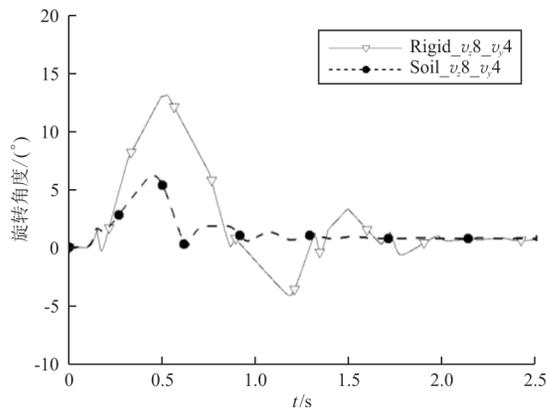


图 10 货物旋转角度对比  
Fig. 10 Rotation angle comparison of cargo between two ground model

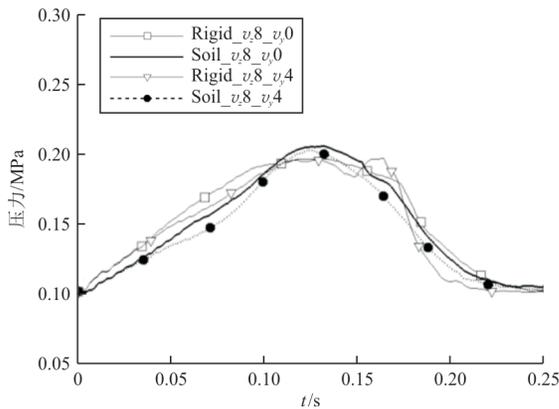


图 11 1号气囊压力对比  
Fig. 11 Pressure comparison of airbag 1 between two ground model

气囊接地缓冲阶段货台只受来自气囊的力,以1号气囊为例(图11),在该时间段内由于刚性下垫板撞击地面时剧烈回弹而导致刚性地面下气囊压力大于土壤地面下气囊的压力,最终导致两种典型工况下货台撞击刚性地面的时刻晚于撞击土壤地面的时刻,且刚性地面下货物撞击地面时的竖向速度小于土壤地面的竖向速度。初始竖向速度相同时,横风影响下货物和货台会因气囊的拉力和支持力而发生偏转(图7(c)),更早撞击地面。

货台撞击地面时进入首次撞击地面阶段,货物竖直方向的过载迅速增大。刚性地面与土壤地面两种典型工况下空投系统重要参数对比如表3所示,可以看出:虽然货台撞击土壤地面时的竖向速度大于撞击刚性地面时的竖向速度,但土壤地面的变形效应(如图12所示)使得竖直冲击时,土壤地面下货物的峰值过载与刚性地面下货物的竖直方向最大过载差异不大(5.26%);横风影响下,土壤地面下货物的竖直方向最大过载小于刚性地面下的最大过载,差异为21.54%。

表 3 刚性地面与土壤地面两种典型工况下空投系统重要参数对比

Table 3 Key parameters comparison of airdrop system between rigid and soil ground

Case	货物撞击地面时刻/s	货物撞击地面时竖向速度/(m·s <sup>-1</sup> )	货物竖直方向最大过载/g
1	0.164	2.01	21.35
2	0.143	3.78	22.54
3	0.146	2.75	43.92
4	0.139	3.85	34.46

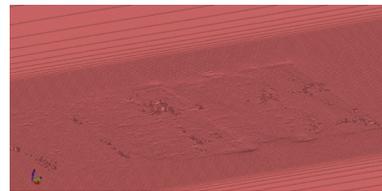


图 12 空投系统冲击过程中对土壤地面的侵彻和破坏现象  
Fig. 12 Phenomenon of penetration and damage of soil

巨大的冲击力会使空投系统发生首次回弹。从图9(a)可以看出:两种典型工况下,空投系统会在重力的作用下再次撞击土壤地面,但不会剧烈地回弹,将逐渐达到静止状态;刚性地面下空投系统在经历衰减撞击与回弹后逐渐达到静止状态(图6(f))。

从图10可以看出:在横风影响下,空投系统在

冲击过程中会发生旋转,但不会发生侧翻。

### 3 横风速度对空投冲击性能的影响

使用土壤地面模型对竖直着陆、前倾着陆冲击工况进行探究,研究工况如表 4 所示。

表 4 土壤地面下工况列表  
Table 4 Working conditions list of soil landing

Case	竖向速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	横向风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	6	0
2	6	2
3	6	4
4	7	0
5	7	2
6	7	4
7	8	0
8	8	2
9	8	4

货物的竖向加速度、横向(y向)速度以及货物旋转角度对比分别如图 13~图 15 所示。

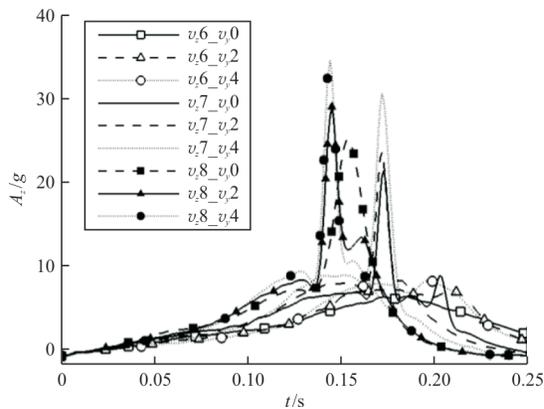


图 13 货物 z 向过载对比

Fig. 13 Comparison of vertical acceleration

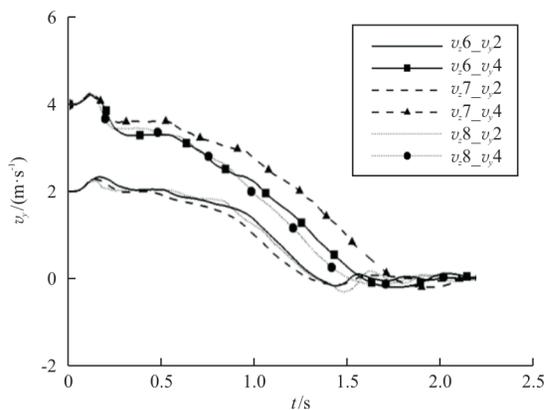


图 14 货物横向(y向)速度对比

Fig. 14 Comparison of lateral velocity

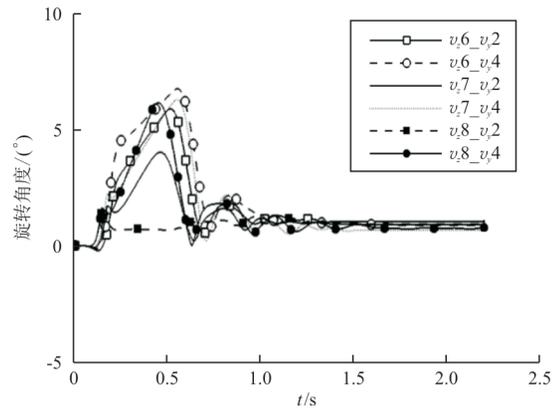


图 15 货物旋转角度对比

Fig. 15 Comparison of rotation angle

从图 13 可以看出:当空投系统的初始竖直速度相同时,横向风速越大,货台撞击地面的时刻越早、货台第一次撞击阶段货物竖直方向的峰值过载越大;当横风速度相同时,初始竖直速度越大,货物竖直方向的峰值过载越大。

从图 14~图 15 可以看出:六种典型工况下空投系统都会经历气囊接地缓冲阶段、首次撞击地面阶段、首次回弹阶段、衰减撞击与回弹阶段,逐渐达到静止状态;横风影响下的空投系统在衰减撞击与回弹阶段不会剧烈地回弹,也不会发生侧翻,满足空投系统的安全条件。

各工况下货物关键参数对比如表 5 所示。

表 5 各工况下货物关键参数对比  
Table 5 Comparison of key parameters

Case	货物撞击地面时刻/s	货物撞击地面时垂直速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	货物竖直方向最大过载/g
1	0.204	0.83	6.03
2	0.197	0.90	6.90
3	0.191	1.08	8.05
4	0.189	1.90	21.28
5	0.167	2.14	23.44
6	0.161	2.37	30.51
7	0.143	3.78	22.54
8	0.140	3.82	28.97
9	0.139	3.85	34.46

### 4 结 论

(1) 空投系统竖直冲击地面时,两种地面模型下货物的最大过载差异很小(5.26%);空投系统

在横风影响下冲击地面时,刚性地面下货物的最大过载与土壤地面模型差异很大,达到 21.54%。故在研究横风对空投的地面缓冲性能的影响时,刚性地面假设不适用,需考虑土壤地面的变形效应。

(2) 土壤地面下,空投系统的初始竖向速度相同时,横向风速越大,竖向峰值过载越大;横向风速相同时,初始竖向速度越大,竖向峰值过载越大。横风影响下的空投系统均不会侧翻,满足空投系统安全条件。

### 参考文献

- [1] 许鑫. 冲压式快速空投缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 59-60.  
XU Xin. Simulation research on stamping type quick airdrop airbag landing process[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(2): 59-60. (in Chinese)
- [2] 汤健华. 车载炮空投系统动力学仿真计算[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
TANG Jianhua. Research on wheel mounted artillery airdrop system dynamic simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 桂冰颖. 重装空投动力学建模与控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
GUI Bingying. Dynamic modeling and control technology research on the transport during heavy cargo airdrop[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [4] 张恒铭, 王军. 重装空投中连投模式对飞机的影响分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28(12): 24-28.  
ZHANG Hengming, WANG Jun. Analysis on the influence of continuous airdrop mode on airplane during airdrop[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(12): 24-28. (in Chinese)
- [5] 李智. 运输机超低空空投大气扰动补偿控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
LI Zhi. Research on atmospheric disturbance compensating control of transport aircraft ultra-low altitude airdrop[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [6] 冯传奇, 刘浩, 孙建红, 等. 基于 ALE 方法的重装空投降落伞充气过程研究[C]// 中国力学大会(2019). 杭州: 中国力学学会, 2019: 2368-2374.  
FENG Chuanqi, LIU Hao, SUN Jianhong, et al. The study on parachute inflation process of heavy-load airdrop based on ALE[C]// The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics (2019). Hangzhou: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 2368-2374. (in Chinese)
- [7] DESABRAIS K J, BERGERON K, NYREN D, et al. Aerodynamic investigations of a ram-air parachute canopy and an airdrop system[C]// 23rd AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conferences. United States: AIAA, 2013: 1-17.
- [8] 厉尚书. 空投鱼雷入水冲击数值模拟的研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.  
LI Shangshu. Numerical simulation of torpedo water-entry impact[D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [9] 赵庆新, 丁忠军. 波浪条件下空投 AUV 入水数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-6.  
ZHAO Qingxin, DING Zhongjun. Numerical simulation of water entry of an air-dropped AUV under wave conditions[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese)
- [10] 王一波, 孙建红, 侯斌, 等. 小型电子设备着陆缓冲气囊的缓冲性能分析[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(5): 25-33.  
WANG Yibo, SUN Jianhong, HOU Bin, et al. Cushioning performance analysis of landing buffer airbag for small electronic equipment[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(5): 25-33. (in Chinese)
- [11] 唐晓慧, 钱林方, 汤建华, 等. 重装空投着陆缓冲稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 122-126.  
TANG Xiaohui, QIAN Linfang, TANG Jianhua, et al. Stability analysis of a soft landing system for heavy cargo airdrop[J]. Journal of Vibration & Shock, 2015, 34(15): 122-126. (in Chinese)
- [12] TAYLOR A, BENNEY R, BAGDONOVICH B. Investigation of the application of airbag technology to provide a softlanding capability for military heavy airdrop: AIAA-2001-2045[R]. USA: AIAA, 2001.
- [13] 王新春. 某车载火箭炮空投着陆冲击仿真与轻量化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.  
WANG Xinchun. Impact simulation and lightweight design of airdrop landing for a vehicle rocket[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 吴磊. 重型装备空投的动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

- WU Lei. Research on airdrop dynamics of heavy equipment [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] FASANELLA E, JONES Y, KNIGHT Jr N, et al. Low-velocity earth-penetration test and analysis[C]// 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. United States: AIAA, 2001: 1-10.
- [16] CHEN Jinbao, NIE Hong, BAI Hemin, et al. A study of the performance of lunar landing considering the deformation of the buffering struts and the lunar soil[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(12): 1-15.
- [17] LEWIS B A. Manual for LS-DYNA soil material model 147 [R]. United States: Federal Highway Administration, 2004.
- [18] REID J D, COON B A, LEWIS B A, et al. Evaluation of LS-DYNA soil material model 147 [R]. United States: Federal Highway Administration, 2004.
- [19] 侯斌. 波浪对直升机应急漂浮系统稳定性的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- HOU Bin. The influence of water wave on stability of helicopter emergency floating system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [20] 吴臣, 侯斌, 孙智, 等. 不规则波浪环境下的直升机入水过程分析[C]// 中国力学大会(2019). 杭州: 中国力学学会, 2019: 3156-3164.
- WU Chen, HOU Bin, SUN Zhi, et al. The analysis of helicopter water-entry in still water and wave environment[C]// The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics (2019). Hangzhou: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 3156-3164. (in Chinese)
- [21] 洪焯杰, 王红岩, 李建阳, 等. 空投装备缓冲气囊匹配设计与仿真计算研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 1-7.
- HONG Huangjie, WANG Hongyan, LI Jianyang, et al. Matching design and simulating calculation of airbag for air-dropping equipment[J]. Journal of Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 1-7. (in Chinese)

#### 作者简介:

连伟欣(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:直升机救生技术,重装空投技术。

侯斌(1981—),男,博士研究生。主要研究方向:空气动力学及计算流体力学。

孙建红(1968—),男,博士,教授。主要研究方向:人机与环境工程。

王从磊(1978—),男,博士,工程师。主要研究方向:可压缩流动与大变形结构流固耦合的数值模拟,降落伞设计与仿真分析。

张彤(1979—),女,博士研究生。主要研究方向:计算流体力学。

(编辑:马文静)