

缓冲与隔振

无人机回收气囊减震性能有限元参数分析

蒋寒¹, 华晓波²

(1.浙江大学 航空航天学院, 杭州 310027; 2.泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201)

摘要: **目的** 伞降-气囊回收方式是目前无人机回收的主要方式, 气囊能够在回收过程中很好地起到降低过载、限制反弹、保护设备的作用, 研究气囊在回收过程中的回收特性对于加快无人机研制进度, 提高无人机的回收质量具有重要意义。 **方法** 采用有限元模拟方法对无人机回收过程中气囊的减震特性进行研究, 以单个气囊为研究对象, 分析气囊充气后压力、气囊排气孔面积和气囊放气压力对气囊减震性能的影响, 并对气囊参数进行优化。将优化过的气囊应用于某型高亚音速无人机, 并对其减震特性进行验证。 **结果** 充气后压力、排气孔面积和放气压力等气囊参数无论过大还是过小都会影响减震性能, 实际应用中必须根据实物具体情况, 确定一组合理的气囊参数。某型高亚音速无人机采用双气囊减震方案, 在进行气囊参数优化后, 回收时其重心位置的加速度明显减小, 飞机回弹速度及剩余速度也得到明显改善, 满足了机体及机载设备对回收过载的要求。 **结论** 采用有限元对气囊的分析和优化方法对于气囊的设计具有较强的指导意义。

关键词: 无人机; 气囊; 减震; 有限元模拟

中图分类号: TB485.1; V249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0067-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.012

Parameter Analysis of Damping Characteristics of Recycled Air Bag of Unmanned Aerial Vehicle with Finite Element Method

JIANG Han¹, HUA Xiao-bo²

(1.School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2.Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

ABSTRACT: The work aims to study the recycling characteristics of the air bag in the recycling process, which is of important significance for the acceleration of development progress and improvement of recycling quality of the unmanned aerial vehicle, regarding the fact that the parachute-air bag is currently the main recycling way of unmanned aerial vehicle, and the air bag can play a very good role in reducing the overload, limiting the rebound and protecting the equipment in the recycling process. The damping characteristics of air bag in the recycling process of unmanned aerial vehicle were studied in the finite element simulation method. With the single air bag as the study object, the effects of inflation pressure, vent area and deflation pressure of air bag on its damping characteristics were analyzed, and the air bag parameters were optimized. The optimized air bag was applied to some high subsonic unmanned aerial vehicle, and its damping characteristics were verified. Parameters of air bag, such as inflation pressure, vent area and deflation pressure (no matter whether they were large or small) would affect the damping characteristics. A group of reasonable air bag parameters should be determined according to the specific circumstances of the object in kind in the practical application. After the optimization of air bag parameters, for some high subsonic unmanned aerial vehicle with the damping scheme of double air bags, the acceleration at its center of gravity was significantly reduced during the recycling, and its rebound velocity and residual velocity were also remarkably improved, which met the requirements with respect to the overloaded recycling of the airframe and airborne equipment. The analysis and optimization of air bag in the finite element method

收稿日期: 2018-03-03

基金项目: 浙江省科技厅重点研发科技资助项目 (2017C01044)

作者简介: 蒋寒 (1985—), 男, 本科, 助理工程师, 主攻无人机机体结构优化设计、无人机发射回收系统优化设计。

通信作者: 华晓波 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为固体力学、有限元分析、强度校核。

play a very important role in guiding the design of air bag.

KEY WORDS: unmanned aerial vehicle, air bag, damping, FE simulation

随着无人机应用领域的不断推广,性能要求的不断提高,其机载设备也日趋复杂,因此需要一种可靠性更高、机动性更好的回收系统来实现对机体及机载设备的保护。伞降-气囊回收系统是小型无人机较为常用的回收方式,无人机通过回收降落伞,将着陆前的速度降至约 6 m/s;剩余动能利用缓冲气囊来吸收,从而达到减少机体及机载设备因着陆而受的过载,避免损伤,实现无人机回收的软着陆^[1]。

从 20 世纪 60 年代起,欧美等发达国家就已经开始研究利用伞降-气囊回收的方式对无人机进行降速回收。像美国的 USD25、AQM234V 无人侦察机,加拿大的 CL289 战地无人侦察机、火星探测器^[2-3]等。到目前为止,气囊减震技术已在航天回收^[4-5]、头盔减震^[6]、空投物资^[7-8]等缓冲吸能方面得到应用,而在无人机回收系统中的应用还处在起步阶段^[9]。

在以往的设计中,气囊的参数主要通过经验加实验的方法来确定,研制成本高,试验周期长,在很大程度上限制了气囊缓冲技术的应用。文中借助 ABAQUS 软件,采用有限元模拟的方法研究单个气囊的减震缓冲性能,使设备在着陆的过程中既能控制过载又能避免反弹,为整机落震实验和气囊参数的确定提供一定的指导,降低设计成本,缩短设计周期。

1 气囊减震原理及分析

采用具有一定速度的设备压缩气囊内部的气体,将本身的动能转换为气体的压缩势能。气囊内气体吸收冲击能量,压力提高,当达到一定的压力之后,开始释放气体;气囊气体释放完全,设备速度也降为 0。在气囊压缩和放气过程中,既要控制设备承受的过载,又要防止设备反弹。典型的气囊减震回收过程可以分为 4 个阶段:气囊充气、气囊触地压缩、气囊放气、设备着陆^[10]。

目前,气囊的数值模拟主要采用 CV (control volume) 方法^[11-12]。假设气囊内部气体是单一的理想气体,且气囊内部各处的压力相等。其状态平衡方程如下^[13]:

$$\tilde{p} = \rho R(T - T_z) \quad (1)$$

式中: $\tilde{p}$ 为气体绝对压力; ρ 为气体密度; R 为气体常数; T 为气体温度; T_z 为绝对零度。

气体的绝对压力 $\tilde{p} = p + p_A$, p 为测量压力, p_A 为环境压力。气体常数 $R = \tilde{R} / M_w$, $\tilde{R}$ 为通用气体常数, M_w 为气体的分子量。

根据热力学第一定律,气囊内部的能量变化可以用以下方程来描述:

$$\frac{d(mE)}{dt} = \dot{m}_{in} H_{in} - \dot{m}_{out} H_{out} - \dot{W} - \dot{Q} \quad (2)$$

式中: E 为气体单位质量比能; $\dot{m}$ 为气体质量流; H 为气体比焓; $\dot{W}$ 为气体膨胀功; $\dot{Q}$ 为透过气囊壁的能量流动。

气体膨胀所做的功 $\dot{W} = p\dot{V}$, 其中 $\dot{V}$ 为气囊体积增量。气体的比能和比焓可分别表示为:

$$\begin{cases} E = E_1 + \int_{T_0}^T C_v(T) dT \\ H = H_1 + \int_{T_0}^T C_p(T) dT \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_1 , H_1 分别为初始比能、初始比焓; T , T_0 分别为当前温度和初始温度; C_v , C_p 为定容比容和定压比容。

气囊放气速度不仅与环境压力 p_A 、气囊内部气体压力 $\tilde{p}$ 有关,还与排气孔的面积 A 有关。假定气囊放气是一个等熵流动的过程,则气体流动的速度可以表示为^[14]:

$$\begin{cases} |\dot{m}| = CA \frac{\tilde{p}}{\sqrt{R(T - T_z)}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(q^{\frac{2}{k}} - q^{\frac{k+1}{k}} \right)} \\ k = \frac{C_p}{C_v} \\ q = \frac{p_A}{\tilde{p}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C 为无因次流量系数。

2 ABAQUS 气囊分析力学模型

文中模拟的设备回收总质量 $m=40$ kg, 竖直着陆速度 $v=6$ m/s, 在 ABAQUS 中采用 4 节点减缩积分应变速率单元 S4R 模拟实际重物。气囊假定是柔性的, 为外径 $D=0.8$ m 的正八边形, 其充气后总体积 $V \approx 0.0648$ m³, 用 M3D4R 膜单元来模拟。地面假定为理想的刚性面, 采用四结点三维双线性刚性四边形 R3D4 单元。

气囊的减震缓冲过程是一个动态、非线性的过程, 而且有较大的变形, 因此在分析计算时采用 ABAQUS/Explicit 的求解器。气囊的减震过程见图 1。

3 气囊参数分析

为了达到安全回收、保护设备的目的, 需严格控制回收中的过载和反弹。也就是说, 气囊能够符合使用的基本条件为^[4]:

- 1) 设备最大过载 $G_{\max} < \text{允许过载 } G_v$ 。
- 2) 设备反弹速度 $v_{\text{Reb}} \approx 0$ 。

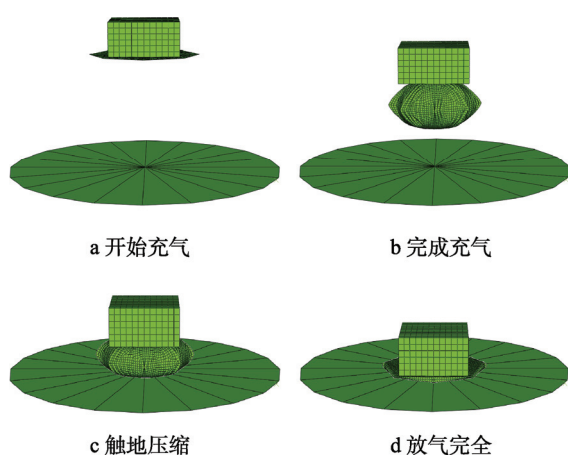


图 1 气囊减震过程

Fig.1 Damping process of air bag

3) 气囊放气结束后设备剩余速度 $v_{\text{Res}} \approx 0$ 。

必须合理确定气囊的各设计参数, 才能达到安全回收、保护设备的目的。

3.1 放气压力 p_E 的影响

为了研究气囊放气压力对缓冲特性的影响, 计算时固定充气后气囊压力 $p_I = 10 \text{ kPa}$, 气囊排气口面积 $A = 4 \times 961.625 \text{ mm}^2$ (等效 $\phi 35 \text{ mm}$)。放气压力 p_E 与设备最大加速度 A_{max} 的关系曲线见图 2, 放气压力 p_E 与设备剩余速度 v_{Res} 以及设备反弹速度 v_{Reb} 的关系曲线见图 3。

从图 2—3 可以得出, 放气压力超过一定数值后, 其值越大, 设备的最大加速度值、反弹速度值也越大。放气压力小于一定数值后, 其值越小, 设备的最大加速度值、反弹速度值也越大。对于前一种情况, 气囊放气压力值越大, 气囊内气体积蓄的势能也越大, 使得设备回弹的速度也增大; 后一种情况, 气囊放气压力值过小, 气囊只能吸收很少部分的能量, 设备则直接与地面以较高速度接触, 所以反弹也大。

可以得出, 在气囊充气后压力和排气口面积一定的情况下, 只要选择适当的放气压力, 就可以使设备的最大加速度和反弹速度均较小, 达到较好的减震效果。

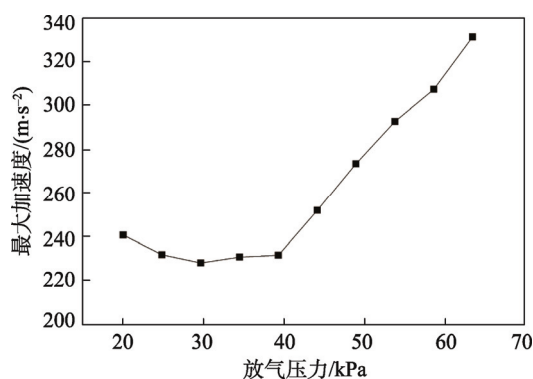


图 2 放气压力对最大加速度的影响

Fig.2 Impact of deflation pressure on the maximum

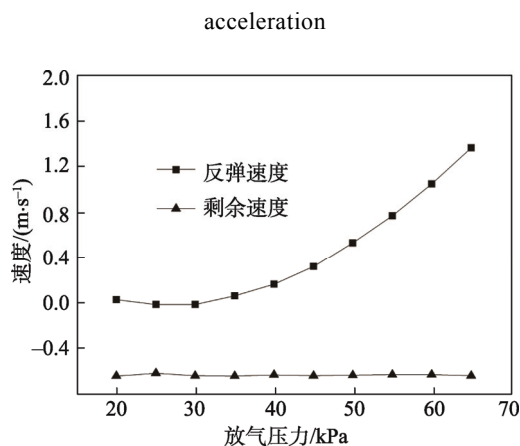


图 3 放气压力对反弹速度、剩余速度的影响

Fig.3 Impact of deflation pressure on rebound velocity and residual velocity

3.2 充气后气囊压力 p_I 的影响

为研究充气后气囊压力 p_I 对缓冲特性的影响, 选一个较合理的放气压力值 $p_E = 35.5 \text{ kPa}$, 排气口面积同样选 $A = 4 \times 961.625 \text{ mm}^2$ 。充气后气囊压力 p_I 与设备最大加速度 A_{max} 的关系曲线见图 4, 充气后气囊压力 p_I 与设备剩余速度 v_{Res} 以及设备反弹速度 v_{Reb} 的关系曲线见图 5。

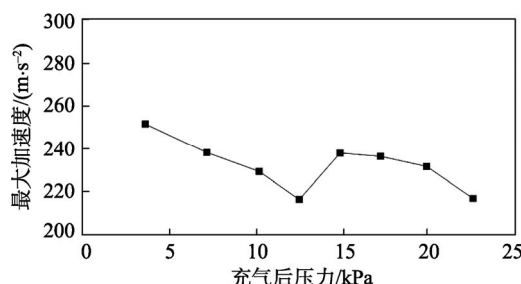


图 4 充气后气囊压力与最大加速度的关系曲线

Fig.4 Curve of relationship between the inflation pressure of air bag and the maximum acceleration

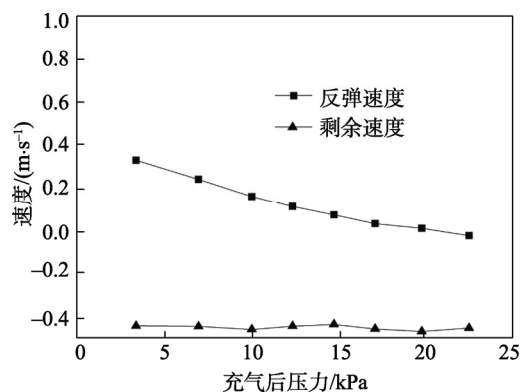


图 5 充气后气囊压力与反弹速度、剩余速度的关系曲线

Fig.5 Curve of relationship between inflation pressure of air bag and rebound velocity and residual velocity

比较 p_I , p_E 的关系曲线可以知道, 充气压力值对于气囊缓冲特性的影响并不是十分显著。 p_I 越大, 气囊充气时间越长, 气囊的压缩行程越小。 p_I 越小,

气囊充气时间越短,气囊吸收冲击能量的能力越弱。需要综合考虑,选用一个合理的充气压力值。

3.3 排气孔面积 A 的影响

实际使用中的气囊可设有多个排气孔,对称分布在气囊上。ABAQUS 模拟分析时只定义一个排气孔,其面积为实际气囊所有孔的总和。计算时固定气囊的充气压力值、放气压力值分别为 $p_1 = 10 \text{ kPa}$ 、 $p_E = 35.5 \text{ kPa}$ 。

从图 6—7 中的曲线可知,排气孔大小对回收时设备最大加速度、设备反弹速度影响比较显著。排气孔过大,排气速度 $|m|$ 过快,使得设备的绝大部分冲击能量无法被吸收,设备会以较大的速度着陆。排气孔过小,排气速度 $|m|$ 缓慢,气囊内部空气压力会不断上升,进而导致设备反弹。由此可见,气囊的排气孔大小的设计,是减震效果好坏的关键。

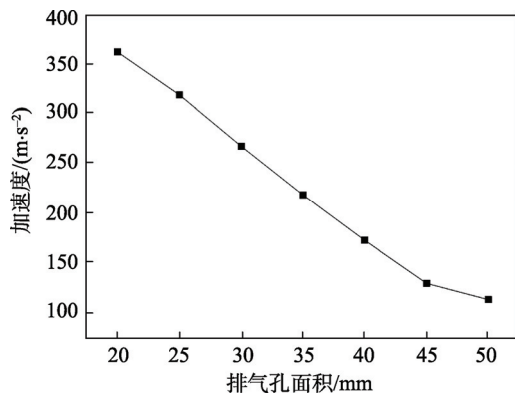


图 6 排气孔面积对最大加速度的影响

Fig.6 Impact of vent area on the maximum acceleration

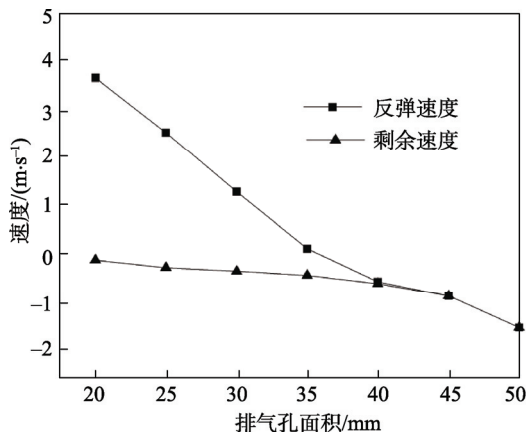


图 7 排气孔面积对反弹速度、剩余速度的影响

Fig.7 Impact of vent area on rebound velocity and residual velocity

4 某型无人机仿真计算

某型高亚音速无人机的回收总质量为 80 kg , 竖着着陆速度为 6 m/s , 回收方式为伞降-双气囊减震, 气囊为外径 0.8 m 的正八边形, 每个气囊共有 4 个排

气孔, 充气后气囊总体积为 0.0648 m^3 。回收过程中要求设备的最大过载 $G_{\max} \leq 150 \text{ m/s}^2$, 反弹速度 $v_{\text{Reb}} \approx 0$, 剩余速度 $|v_{\text{Res}}| \leq 1 \text{ m/s}$ 。

通过前面的分析, 选用一组合理的气囊参数: 充气后气囊压力 $p_1 = 12.5 \text{ kPa}$, 气囊放气压力 $p_E = 35.5 \text{ kPa}$, 气囊排气孔总面积 $A = 4 \times 961.625 \text{ mm}^2$ 。

分别对无人机在无气囊、双气囊条件下的着陆过程进行模拟, 无人机在无气囊减震缓冲情况下重心位置在着陆过程中加速度和速度曲线见图 8—9。无人机在双气囊减震缓冲情况下重心位置在着陆过程中的加速度和速度曲线见图 10—11。

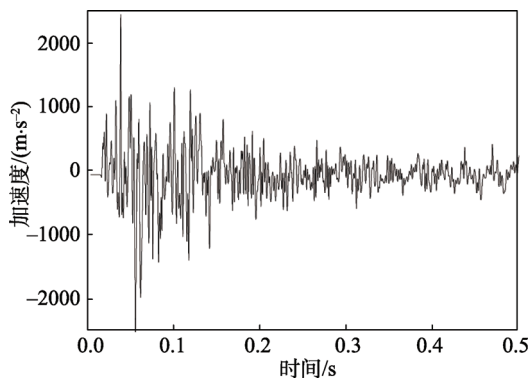


图 8 无气囊回收加速度曲线

Fig.8 Acceleration curve of recycling without air bag

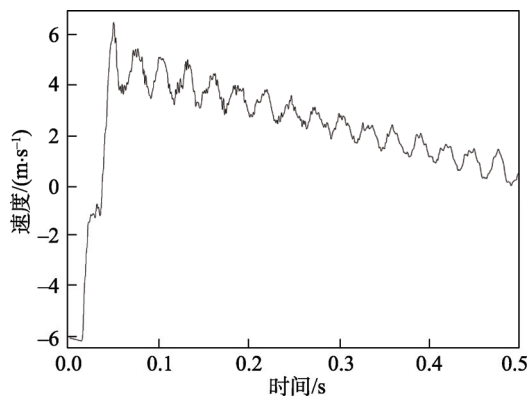


图 9 无气囊回收速度曲线

Fig.9 Velocity curve of recycling without air bag

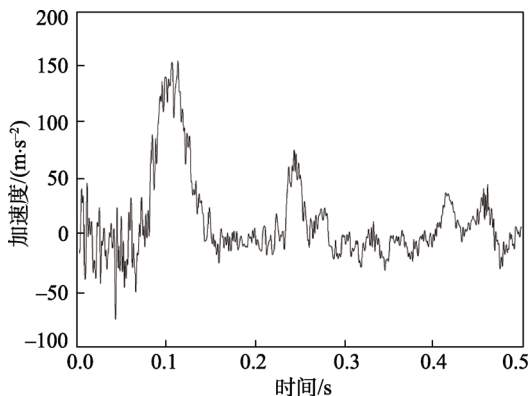


图 10 双气囊回收加速度曲线

Fig.10 Acceleration curve of recycling with double air bags

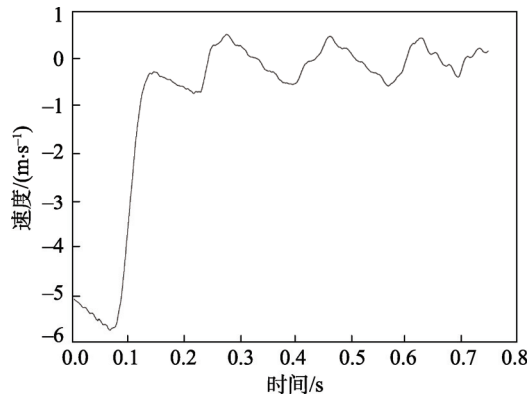


图11 双气囊回收速度曲线

Fig.11 Velocity curve of recycling with double air bags

可知, 无人机在无气囊硬着陆时的加速度过载量、回弹速度值很大, 已远远超出允许过载值 150 m/s^2 。采用双气囊减震后重心位置的加速度过载明显减小, 飞机回弹速度及剩余速度也得到了改善, 并基本满足设备对最大过载、最大回弹速度、最大剩余速度的要求, 所得到的结果与文献[15]试验结果相似。

5 结语

将伞降-气囊减震方式用于无人机的回收, 能起到降速减震的作用。选择合理的气囊参数对降低回收过载、限制机体反弹、保护机载设备有明显的效果。

气囊的减震效果与其设计参数有关, 包括充气后气囊压力、排气孔面积和放气压力, 这些参数对气囊的缓冲时间、排气孔气体流动速度等都有很大影响。

利用有限元方法研究单个气囊的减震性能, 进而选取合理的气囊参数, 能够为气囊设计提供一定的指导, 并减少实验量, 缩短设计周期, 降低设计成本。

参考文献:

- [1] 齐照辉, 王中伟, 张为华. 无人机自动回收方案研究[J]. 飞行实验, 2003, 19(2): 1—5.
QI Zhao-hui, WANG Zhong-wei, ZHANG Wei-hua. UAV Automatic Recovery Scheme Research[J]. Flight Experiment, 2003, 19(2): 1—5.
- [2] TURNER C T, GIRARD JR LA. Air Bag Impact Attenuation System for the AQM-34V Remote Piloted Vehicle[J]. AIAA 81-1917R, 1981: 1—2.
- [3] 张无明. 无人机回收减震气囊的理论研究[J]. 液压与气动, 2005(1): 7—9.
ZHANG Wu-ming. Theoretical Study on Air Bag Recovery from UAVs[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2005(1): 7—9.
- [4] 邓春燕, 裴锦华. 全向式着陆缓冲气囊的折叠建模与充气过程仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S2): 97—102.
DENG Chun-yan, PEI Jin-hua. Folding Modeling and Inflatable Process Simulation of Omnidirectional Landing Buffer Airbags[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S2): 97—102.
- [5] 卫剑征, 谭惠丰, 万志敏, 等. 缓冲气囊展开与缓冲着陆过程的仿真分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5): 1—8.
WEI Jian-zheng, TAN Hui-feng, WAN Zhi-min, et al. Simulation Analysis of Buffer Airbag Deployment and Buffer Landing Process[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2010, 31(5): 1—8.
- [6] KURT M, LAKSARI K, KUO C, et al. Modeling and Optimization of Airbag Helmets for Preventing Head Injuries in Bicycling[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2016, 45(4): 1—13.
- [7] 牛四波, 王红岩, 迟宝山, 等. 重装回收系统双气室气囊缓冲特性分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 74—78.
NIU Si-bo, WANG Hong-yan, CHI Bao-shan, et al. Cushioning Characteristics of Double-chamber Airbag for Heavy Equipment Recovery System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 74—78.
- [8] 孙宁国, 李良春. 空投着陆缓冲气囊研究现状[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 97—101.
SUN Ning-guo, LI Liang-chun. Research Status of Airdrop Landing Buffer Airbags[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 97—101.
- [9] DOLLAH N A, SAAD M R, CHEIDRIS A. Inflatable Structure for Aerospace Application: Historical Perspective and Future Outlook[J]. 2017, 9: 317.
- [10] TIMMERS R, HARDY R, WELCH J. Modeling and Simulation of the Second-Generation Orion Crew Module Airbag Landing System[J]. Aiaa Journal, 2013, 092407: 6—8.
- [11] MASOUD A, AHMAD A, EBRAHIM K. Shape and Orifice Optimization of Airbag Systems for UAV Parachute Landing[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2014, 15(3): 335—343.
- [12] 张忠伟. 无人机回收气囊减震性能的计算分析[J]. 液压与气动, 2004(2): 28—31.
ZHANG Zhong-wei. Calculation and Analysis of Damping Capacity of Unmanned Air Vehicle Recovery Air Bag[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2004(2): 28—31.
- [13] 代小芳, 宗智, 王喜军, 等. 折叠气囊展开过程 CV 和 ALE 数值模拟方法对比研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(8): 676—680.
DAI Xiao-fang, ZONG Zhi, WANG Xi-jun, et al. Comparative Study of CV and ALE Numerical Simulation Methods for Folding Balloon Deployment[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(8): 676—680.
- [14] 戈嗣诚, 施允涛. 无人机回收气囊缓冲特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(4): 458—462.
GE Si-Cheng, SHI Yun-Tao. Study on the Cushioning Characteristics of UAV Recovery Airbags[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(4): 458—462.
- [15] 李建阳, 王红岩, 芮强, 等. 自充气式气囊缓冲特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 119—123.
LI Jian-yang, WANG Hong-yan, RUI Qiang, et al. Experimental Study on Buffering Characteristics of Self Inflating Air Bag[J]. Vibration and Shock, 2014, 33(4): 119—123.