

空投着陆缓冲气囊研究现状

孙宁国¹, 李良春²

(1.军械工程学院, 石家庄 050000; 2.军械技术研究所, 石家庄 050000)

摘要: **目的** 总结当前着陆缓冲气囊的国内外研究现状。**方法** 介绍不同缓冲气囊的工作原理与优缺点, 总结解析与有限元2种气囊性能的计算方法与性能参数优化方法的研究现状, 以及气囊技术研究的发展方向。**结果** 分析了各类缓冲气囊与性能参数计算方法的优缺点, 总结了气囊技术待解决的问题。**结论** 提高缓冲气囊的气压主动控制技术与着陆姿态控制技术可进一步提高气囊性能。

关键词: 气囊; 缓冲; 空投; 研究现状

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0097-05

Research Status of Landing Airbag for Airdrop

SUN Ning-guo¹, LI Liang-chun²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China;

2. Ordnance Technology Institute, Shijiazhuang 050000, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the current research status of the landing airbag. Firstly, the working principle, advantages and disadvantages of different cushioning airbags were introduced. Then, the calculation methods and performance parameter optimization methods of the two kinds of airbags in finite element analysis, as well as the development of airbag technology was summarized. As a result, the advantages and disadvantages of all kinds of cushion airbag and performance parameter calculation methods were analyzed, and the problems to be solved by airbag technology were summarized. In conclusion, improving pressure active control technology and landing attitude control technology can further improve airbag performance.

KEY WORDS: airbag; cushion; airdrop; research status

空投是部队战时装备垂直保障方式之一, 利用空投既能减少部队携行质量, 也能及时补充前线装备物资, 满足作战需求。同时, 空投也是实施事故救援的重要手段之一。空投缓冲包装是确保物资保持使用可靠性的重要保证, 气囊作为众多缓冲方式的一种, 因其技术简便易行、成本低与良好的缓冲效果, 使用最为广泛。文中将从缓冲气囊的分类、性能参数计算与优化方法、技术发展方向3个方面作出现状总结分析。

1 缓冲气囊分类

实现空投着陆缓冲主要分瞬时降速与能量耗散2种方式^[1]。气囊缓冲属于能量耗散方式的一种, 在着

陆时通过压缩气体做功、消耗冲击动能来实现对空投物的缓冲。缓冲气囊按作用机理可分为密闭型气囊、排气型气囊和组合型气囊。

1.1 密闭型气囊

密闭型气囊在缓冲过程中保持全程密闭, 通过内部气体的压缩流动以及系统的多次弹跳来转移消耗冲击能量^[2]。其优点是结构简单、制作方便, 缺点也很明显, 如对气囊材料要求高, 着陆姿态难以控制, 并且易产生击穿、翻覆与触底反弹的反效果, 在空投作战装备时较少使用, 尤其是空投弹药、精密仪器等脆值较低的物资时。

密闭型气囊的典型应用如美国“火星探路者”、

收稿日期: 2016-11-28

作者简介: 孙宁国(1992—), 男, 军械工程学院硕士生, 主攻通用装备物流工程及其应用。

通讯作者: 李良春(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为装备供应保障。

“勇气号”和“机遇号”的全向式多室连通气囊^[3-4], 见图1, 该气囊各气室间相互连通, 能够实现全方向缓冲和无死角保护。Cole 与 Waye^[5]等利用编程模拟了该气囊的着陆冲击过程, 计算得出探测器的冲击加速度曲线与气囊压力时间曲线。文桂林^[6]等利用有限元软件 LS-DYNA 建立了全向式多室连通气囊有限元模型, 并对气囊缓冲特性进行了研究, 其研究可对该类气囊的设计进行指导。

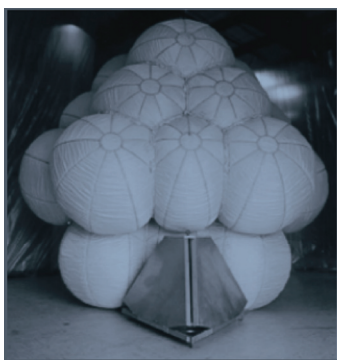


图1 全向式多室连通气囊

Fig.1 Omni-directional and multi-chamber airbag

1.2 排气型缓冲气囊

排气型缓冲气囊在气囊周围增设了排气孔, 其缓冲耗能通常分为2个阶段, 见图2。第1阶段气囊保持封闭, 通过气体压缩来吸收能量, 当压力超过排气孔承受阈值时进入第2阶段, 排气孔开始排气, 气囊向外耗散能量直至结束。该气囊比密闭型气囊体积小, 在排气孔面积设计合理的情况下, 可避免气囊反弹, 利于控制着陆姿态, 并可降低气囊织布承受的最大压力, 减小对气囊织布的要求。由于最大压力保持时间短, 动能常常不能在气体排空前全部耗散, 最后会对空投物造成硬着陆冲击。Northey^[7]等结合 F-111 弹射座舱与欧洲航天局研发的火星着陆气囊实例全面分析了排气型气囊在不同环境任务中的优缺点, 指出了排气型气囊的快速撤收对军事行动的重要影响。

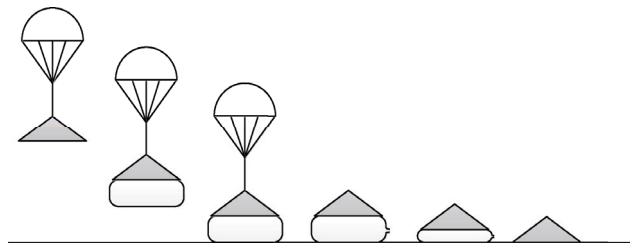


图2 排气式气囊工作流程

Fig.2 Vented airbag landing

邵志建^[8]等在排气型气囊的基础上设计了一种新型自充气气囊, 已成为当前气囊研究使用的主流, 自充气气囊在底部设计有进气口, 使气囊空投下落时可利

用气动阻力冲压充气, 其进气孔的设计利用了布料易弯曲变形的特点来实现开启封闭, 见图3, 大大减少自带气源的质量, 并节省大量成本。李建阳^[9]等对排气孔常开和排气孔粘结2种自充气式气囊进行了室内投放试验, 探索了气囊参数、着陆条件与排气孔粘结对缓冲效果的影响。刘守君^[10]等设计了三气室的自充气气囊, 该气囊主气室利用下落速度冲压集气, 两侧辅气室利用自带气源充气, 减轻了系统自身质量, 得到了良好的缓冲保护效果。

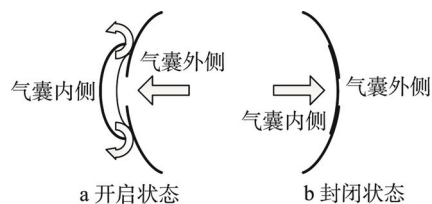


图3 气囊进气孔的开启和封闭状态

Fig.3 Inlet open and closed diagram of the cushion airbag

1.3 组合型缓冲气囊

组合型缓冲气囊通常由密闭型气囊与排气型气囊组合而成, 排气型气囊受冲击时通过排气耗散能量, 密闭型气囊保持全程密闭, 在排气型气囊气体排空后起到支撑作用, 防止空投物硬着陆, 避免二次冲击。美国 ILC 与 ASNA 公司分别为“猎户座”返回舱设计了2种组合式缓冲气囊^[11], ICL 公司将外气囊制作成环形连接的水平圆柱状, 见图4a, ASNA 公司的外气囊设计模拟了圆柱体受压变形后的形状, 以系统更快的缓冲速度为代价来提高缓冲效率, 见图4b。美国 ExoMars 火星探测器^[12]同样采用组合型气囊, 见图5, 该主气囊分为6个腔室, 内置1个气压更大的密闭型环形气囊, 主气囊完成排气减速后可为着陆器吸收剩余的动能。

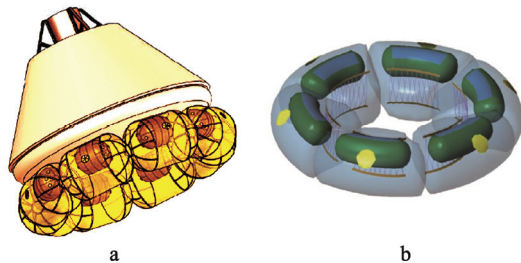


图4 猎户座着陆缓冲系统

Fig.4 CEV airbag landing system

蔡文^[13]等建立了无人机着陆缓冲系统的解析模型, 研究了无人机软着陆气囊缓冲特性, 提出一种组合型气囊设计方案, 避免无人机发生二次冲击与反弹翻覆。乐永祥^[14]对双气室组合型气囊进行了缓冲过程

的分析与优化, 该研究具有重要参考价值。



图 5 Exo-Mars 着陆缓冲系统
Fig.5 Exo-Mars airbag landing system

2 气囊性能参数计算与优化方法

气囊缓冲性能参数计算与优化是气囊设计的重要环节。气囊的投放实验虽然具有不可替代的地位, 但实验周期长、成本高, 对参数的控制不精确, 实验前精确计算并优化各性能参数对于实验的顺利开展与提高实验质量都具有十分重要的意义。

2.1 解析计算法

解析建模法是一种常用的气囊模型求解方法, 通过分析气囊绝热压缩阶段和排气释能阶段来建立热力学方程和动力学方程, 而后求解缓冲系统的响应。利用解析模型可以计算缓冲气囊内初始压强、排气孔面积及气囊体积比等不同参数对气囊缓冲特性的影响。

Cole^[5]等建立了“火星探路者”气囊缓冲系统的解析数学模型, 计算了气囊和有效载荷在缓冲反弹过程中的动态特性, 计算结果与试验结果吻合较好, 为气囊缓冲系统的设计提供了计算支持。温金鹏^[15]等建立了物理解析分析模型, 对固定排气孔软着陆气囊的缓冲特性进行了分析, 研究了织布弹性对缓冲性能的影响, 并用仿真软件验证了有效性。吕哲源^[16]等建立了无量纲空投缓冲过程的数学模型, 研究了缓冲系统各参数对气囊缓冲性能的影响, 提出了缓冲系统的参数匹配设计方法。曲普^[17]等分析了环境温度、大气密度和压力等空投环境参数对气囊缓冲性能的影响, 为气囊在高海拔的使用提供参考。牛四波^[18]等建立了重装空投双气室气囊的解析模型, 并利用仿真软件验证了其有效性, 而后研究了主辅气囊各参数对缓冲性能的影响, 其结论明确了重装气囊的优化目标。

2.2 有限元计算法

气囊缓冲过程涉及气囊的形变、位移、气囊内气体流动等问题, 是一个极其复杂的物理过程, 常规解析模型无法全面仿真上述问题, 并且需在一定假设和前提下来求解。利用有限元法可不受上述问题限制, 可进行更有效的求解。目前有限元分析法主要分控制体积法 (CV 法)、任意拉格朗日法 (ALE 法) 与粒

子法 (CPM 法)。

CV 法^[19-20]基于热力学理论, 将气室看作一个控制体积, 由气囊织布表面的单元围成, K 文件关键字可用 “*AIRBAG_WANG_NEFSKE” 来定义。该方法具有 2 个基本假设: 气囊内气体满足理想气体条件; 气囊室内的温度和压力分布处处相等。该方法的缺点是气囊展开初期与物体作用的模拟真实性不够, 但是对气囊的压缩模拟较准确、计算效率高, 因此在气囊着陆缓冲的有限元仿真中最为常用。ALE 法^[21]控制方程由质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律得出, 可得出流场内各位置的基本物理量分布以及随时间的变化情况, 其关键字为 “*AIRBAG_ALE”。该法能够克服单元严重畸变引起的数值计算困难, 确保大变形行为的数值分析精度, 精确模拟气囊展开过程中的流场分布情况, 但计算时间较长。CPM 法^[22]是在 2007 年提出的, 它既能更好地预测气囊展开形态, 又可减少计算时间。该法将气体粒子进行离散化处理, 通过对气体粒子的建模来模拟气体充入柔性边界的封闭腔体, 在每个求解循环中计算并创建新产生的粒子数, 从而实现入射气体的模拟, 关键字为 “*AIRBAG_PARTICLE”。

2.3 气囊参数优化

影响气囊缓冲效果的因素有多种, 包括气囊的结构类型、尺寸大小、初始压力、排气孔面积、排气压力以及环境压力温度等。综合利用合理的优化方法对多目标进行优化, 确保最小过载, 不仅能从理论上提高缓冲性能, 还可以在实际实验中缩短周期、降低成本。

国外 Slade^[12]等采用移动最小二乘法拟合出 EXO-Mars 的冲击响应面, 通过分析全局最优优点得出结论, 即气囊需进一步增大排气孔面积。Tutt^[23]等采用序列响应面法优化了超音速实验飞机 NEXST-2 的着陆气囊参数, 使其着陆最大加速度减少了 1.2g, 提高了气囊性能。尹汉锋^[24]等利用 LS-DYNA 仿真计算结果, 采用遗传算法对气囊排气孔面积、初始压力和排气压力进行优化, 减少了空投实验次数和成本。文桂林^[25]等利用 ISIGHT 多学科优化平台综合 LS-DYNA 软件与 FORTRAN 编程对双气室气囊进行了多学科优化, 效果明显。刘鑫^[26]等以微型多目标遗传算法对气囊尺寸压力参数以及爆破膜和喷管结构尺寸进行了优化, 减少了气囊设计实验次数, 具有一定工程意义。马常亮^[27]等建立了排气式气囊与回收舱简化分析模型, 并采用响应面法得到了排气孔面积与回收舱重心处过载的关系, 通过仿真分析确认了优化分析结果的有效性。

3 气囊技术及其发展

提升气囊性能, 除常规构型的改进与参数优化来展开对气囊控制技术的研究外, 囊内气压的控制、着陆

姿态控制等会使缓冲系统的性能得到进一步的提高。

3.1 气压主动控制技术

气压主动控制技术是指利用控制技术来主动控制气囊内压力大小,使气囊泄压时保持囊压稳定,在缓冲结束后还可保持气囊留有气体,给予空投物弹性支撑。实现囊压控制有 2 种途径:控制排气孔面积大小,使排气孔面积随囊内气压变化而改变,戈嗣诚^[28-29]等根据气囊缓冲内部压力与过载的变化,采用磁滞伸缩作动器驱动排气阀来实时控制排气孔大小,实现面积的主动控制,李博^[30]等提出利用电流变阻尼器与弹簧相结合的驱动方式控制排气孔在排气阶段的面积大小,以保持气体压强恒定,确保缓冲过载分布均匀;在排气时利用气源对气囊充气增压来控制气囊体积压力,如 Lee^[31-32]等对增压型气囊进行了研究,通过连续增大充入气囊内的气体质量流率来控制气囊体积,但因其技术的复杂性与不稳定性,还需深入研究实验后才能在实际空投中得到应用。

3.2 着陆姿态控制技术

气囊的着陆稳定性是空投必须考虑的因素之一,目前气囊空投实验多数为定向空投,实验地形平坦,仿真实验也大多没有考虑复杂地形的影响,但在实际空投时,气囊着陆常伴随倾倒、内陷等问题。在弹药等装备空投着陆时,保持良好着陆姿态是保持其安全可靠性的必要条件,因此对姿态稳定性控制的研究也十分必要。Slade^[12]等便在 EXO-Mars 气囊仿真中考虑了俯仰角对着陆稳定性的影响,并在刚性地面上增加了岩石模型。唐晓慧^[33]等建立了货台与地面的碰撞模型,对具有水平速度的货台与地面进行碰撞分析,得到货台碰撞后的速度和转角,为碰撞后货台的最终姿态与速度提供了计算方法。朱延波^[34]针对着陆不稳定性,设计了一种可利用气囊膨胀顶出的地锚,地锚插入地面稳定着陆姿态,防止了侧翻和反弹的发生。

4 结语

气囊作为空投着陆缓冲技术中最为高效价廉的方式之一,有着广阔的发展前景,未来将会在更多缓冲包装防护上得到应用。文中通过对气囊发展的国内外现状分析,总结出可提高气囊性能的气压主动控制技术与着陆姿态控制技术,为今后的气囊缓冲技术发展研究提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 于成果,李良春.空投安全着陆的实现途径[J].包装工程,2007,28(10):144—146.
YU Cheng-guo, LI Liang-chun. Ways of Airdrop Safety Landing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10):

- 144—146.
- [2] 温金鹏,李斌,杨智春.缓冲气囊冲击减缓研究进展[J].宇航学报,2010,31(11):2438—2447.
WEN Jin-peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Progress of Study on Impact Attenuation Capability of Airbag Cushion System[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2438—2447.
- [3] THURMAN S W. Return to the Red Planet: An Overview of the Mars Pathfinder Mission[C]//13th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, 1995: 24—31.
- [4] CADOGAN D, SANDY C, GRAHNE M. Development and Evaluation of the Mars Pathfinder Inflatable Airbag Landing System[J]. Acta Astronautica, 2002, 50(10): 633—640.
- [5] COLE J K, WAYE D E. Bag: A Code for Predicting the Performance of a Gas Bag Impact Attenuation System for the Pathfinder Lander[R]. Albuquerque: Sand, 1993.
- [6] 文桂林,雷志华,尹建武,等.全向式多室连通气囊的缓冲特性研究[J].振动与冲击,2013,32(8):13—17.
WEN Gui-lin, LEI Zhi-hua, YIN Jian-wu, et al. Cushion Characteristics of an Omni-directional and Multi-chamber Airbag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8): 13—17.
- [7] NORTHEY D, MORGAN C. Improved Inflatable Landing Systems for Low Cost Planetary Landers[J]. Acta Astronautica, 2006, 59(8): 726—733.
- [8] 邵志建,刘志扩.新型自充气气囊研究[J].南京航空航天大学学报,2009,41(S):84—88.
SHAO Zhi-jian, LIU Zhi-kuo. Study on New Self-Inflating Airbag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S): 84—88.
- [9] 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. Tests for Cushioning Characteristics of a Self-inflating Airbag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 119—123.
- [10] 刘守君,齐明思,黄宏胜,等.新型自充气式着陆缓冲气囊的理论分析与设计研究[J].包装工程,2015,36(1):107—110.
LIU Shou-jun, QI Ming-si, HUANG Hong-sheng, et al. Theoretical Analysis and Design of a New Self-inflating Landing Cushion Airbag[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 107—110.
- [11] TUTT B, SANDY C. Status of the Development of an Airbag Landing System for the Orion Crew Module[C]//20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2009: 1—13.
- [12] SLADE R, SHARP P, JONES R, et al. Analysis, Optimization and Probabilistic Assessment of an Airbag Landing System for the ExoMars Space Mission[C]//11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2006.

- [13] 蔡文, 李斌, 温金鹏, 等. 无人机软着陆气囊缓冲特性研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1867—1875.
CAI Wen, LI Bin, WEN Jin-peng, et al. Research on Cushioning Characteristics of UAV Soft Landing Airbags[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(11): 1867—1875.
- [14] 乐永祥. 着陆缓冲气囊缓冲过程数值模拟和优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
LE Yong-xiang. Numerical Simulation and Optimal Design of the Process of Airbag Landing[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [15] 温金鹏, 李斌, 谭德伟, 等. 考虑织布弹性的软着陆气囊缓冲特性研究[J]. 振动与冲击, 2010(2): 79—83.
WEN Jin-peng, LI Bin, TAN De-wei, et al. Cushioning Characteristics of a Soft Landing Airbag with Elastic Fabric[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010(2): 79—83.
- [16] 吕哲源, 王红岩, 洪煌杰, 等. 空投设备气囊缓冲系统的缓冲特性分析与匹配方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(4): 34—39.
LYU Zhe-yuan, WANG Hong-yan, HONG Huang-jie, et al. Cushioning Properties Analysis and Matching Method of Airbag Cushioning System for Airdropped Equipment[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(4): 34—39.
- [17] 曲普, 史锐, 李锦红, 等. 空投着陆气囊缓冲系统环境适应性研究[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 64—68.
QU Pu, SHI Rui, LI Jin-hong, et al. Cushioning Property and Environmental Adaptability of Airbag Landing System[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 64—68.
- [18] 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.
- [19] WANG J T. An Analytical Model for an Airbag with a Hybrid Inflator[J]. ASME Crashworthiness Occupant Protection Transportation System, 1995(3): 467—497.
- [20] WANG J T, NEFSK D J. A New CAL3D Airbag Inflation Model[C]// Congress and Exposition, General Motors Research Laboratories, Society of Automotive Engineers, 1998.
- [21] DONEA J, HUERTA A, PONTHOT J, et al. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method[J]. Encyclopedia of Computational Mechanics, 2004(1): 1—25.
- [22] OLOVSSON L. Corpuscular Method for Airbag Deployment Simulation[C]// 6th European LS-DYNA Users' Conference, 2007.
- [23] TUTT B, SANDERS J, MYNENI S. Application of Optimization Software to Aid the Design of an Airbag Decelerator System[J]. Biochemistry, 2013, 47(16): 80—87.
- [24] 尹汉锋, 文桂林, 韩旭. 空投设备缓冲气囊的优化设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1325—1327.
YIN Han-feng, WEN Gui-lin, HAN Xu. Optimal Design of Airbag Impact Attenuation System for Airdropping Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(5): 1325—1327.
- [25] 文桂林, 乐永祥, 尹汉锋, 等. 双气室缓冲气囊多学科设计优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(7): 27—31.
WEN Gui-lin, LE Yong-xiang, YIN Han-feng, et al. Optimal Design of Double-chamber Airbag Based on Multidisciplinary Design Optimization Technology[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(7): 27—31.
- [26] 刘鑫, 韩旭, 刘桂萍. 基于微型多目标遗传算法的气囊缓冲特性优化[J]. 中国机械工程, 2009, 20(15): 1819—1823.
LIU Xin, HAN Xu, LIU Gui-ping. Optimization of Cushion Characteristic of Airbag Based on Micro Multi-objective Genetic Algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(15): 1819—1823.
- [27] 马常亮, 何欢, 陈国平. 气囊着陆缓冲系统的排气孔面积优化[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(4): 6—10.
MA Chang-liang, HE Huan, CHEN Guo-ping. The Optimization of Venting Area of Airbag Landing System[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(4): 6—10.
- [28] 戈嗣诚, 陈斐. 智能气囊的冲击主动控制原理实验研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 600—603.
GE Si-cheng, CHEN Fei. Experimental Study on Theory of Impact Active Control of Intelligent Airbag[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 600—603.
- [29] 戈嗣诚, 陈斐. 缓冲特性可控的智能气囊装置实验研究[J]. 振动工程学报, 2004(4): 5—9.
GE Si-cheng, CHEN Fei. Experimental Study on Intelligent Airbag Device with Controllable Cushioning Characteristics[J]. Journal of Astronautics, 2004(4): 5—9.
- [30] 李博, 高树义. 排气式气囊缓冲主动控制技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(3): 39—47.
LI Bo, GAO Shu-yi. Study of Active Airbag Vent Control Technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(3): 39—47.
- [31] LEE C K. Methods for Improved Airbag Performance for Airdrop[R]. Natick: Army Natick Research, Development and Engineering Center, 1992.
- [32] LEE C, ROSATO N, LAI F. An Investigation of Improved Airbag Performance by Vent Control and Gas Injection[C]// 11th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, 1991: 455—464.
- [33] 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 Xiao-hui, QIAN Lin-fang, TANG Jian-hua, et al. Stability Analysis of a Soft Landing System for Heavy Cargo Airdrop[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(15): 122—126.
- [34] 朱延波, 陈卫, 仝崇楼, 等. 一种新型空投用缓冲装置的设计[J]. 机械设计, 2011, 28(6): 67—69.
ZHU Yan-bo, CHEN Wei, TONG Chong-lou, et al. Design of a New Buffer Device for Paratrooping[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 28(6): 67—69.