

开伞高度对救生伞开伞动载与附加质量的影响研究



陈杰,张红英,张宇晨

南京航空航天大学, 江苏南京 210016

摘要:国内外大量空投试验数据表明,密实织物圆形人用降落伞的开伞动载与开伞高度有着密切的联系,但开伞高度对开伞动载影响的研究并不深入。本文基于自适应网格法(ALE)对C-9伞进行了开伞过程数值仿真,并将仿真得到的开伞动载和试验进行了对比,验证了仿真方法的可靠性。同时,研究八门活动幅救生伞在不同高度下的开伞过程,分析其开伞动载和附加质量变化,得出随着开伞高度的增加,开伞动载变大而附加质量减小的结论。阐明了开伞高度对开伞动载的影响机理,为人用伞在不同海拔高度下的使用限载设计提供理论支持。

关键词:救生伞;流固耦合;开伞高度;开伞动载;附加质量

中图分类号:V244

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.05.013

在降落伞开伞过程中,由于系统突然减速而产生的作用在跳伞员身上的载荷叫作开伞动载。开伞动载是衡量救生伞性能的重要指标之一,必须满足人体的生理指标要求。大量空投试验数据表明,开伞动载与开伞高度有着密切的关系,因此,研究两者之间的关系有十分重要的意义。近年来,基于流固耦合的数值模拟技术已成为解析伞衣系统动态载荷特性的主要方法^[1-7],Kalro等^[8]将并行化的稳定时空方法(DSD/SST)应用于降落伞系统模拟,处理降落伞布料随时间变化的动态变形域问题,为复杂动态域问题提供了高效、稳定的数值工具。聂德新等^[9]通过对国内外救生伞开伞过载试验数据的分析,得出对于伞衣负荷较小的救生伞,在同样的拉直速度条件下,开伞高度的增加会导致最大开伞过载值上升的结论。龚文轩^[10-11]通过理论计算的方法分析出救生-10型伞的开伞动载随开伞高度增加而增大。目前针对开伞高度对开伞动载的影响研究较少,规律不清晰,尤其缺少定量的分析,进一步研究其内在关系显得极为重要。

降落伞的附加质量指的是降落伞系统在降落过程中由于伞衣的张开、空气阻力,以及与物体的相互作用所产

生的“额外质量”效应,是使得系统的“有效质量”大于实际质量的现象。降落伞的附加质量理论计算较为复杂,常采用经验法进行估算或者基于理想伞衣形状下的附加质量系数进行估算,无法得到准确的结果。Usbaldo等^[12-14]通过理论建模与试验相结合,开展了降落伞附加质量的专题研究,提高了对降落伞附加质量的计算精度。龚文轩^[15]采用经典的半球方法研究了降落伞的内含质量和表观质量,但是降落伞开伞过程中其附加质量会一直变化,此种方法缺少精确性。黄伟^[16]对降落伞附加质量的数值计算方法进行了初步探讨,得出充气半径算法可计算径向附加质量和轴向附加质量。目前对于附加质量的研究主要是基于理想伞衣形状假设下,采用附加质量系数的计算方法,然而对于附加质量系数的确定缺少相关研究,并且关于开伞高度与附加质量之间关系的研究几乎空白。

因此,本文将进一步探讨开伞高度与开伞动载和附加质量之间的关系,阐明开伞高度对开伞动载的影响机理,为人用伞在不同海拔高度下的使用限载设计提供理论支持。

收稿日期: 2024-09-29; 退修日期: 2024-12-10; 录用日期: 2025-02-17

基金项目: 航空科学基金(20200029052004)

引用格式: Chen Jie, Zhang Hongying, Zhang Yuchen. Research on the impact of opening height on parachute dynamic load and added mass of rescue umbrellas[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(5): 104-110. 陈杰, 张红英, 张宇晨. 开伞高度对救生伞开伞动载与附加质量的影响研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(5): 104-110.

1 开伞动载的计算方法与试验验证

1.1 计算相关理论

在救生伞开伞流固耦合计算模型中,使用结构-自适应网格(S-ALE)法对救生伞和空气的运动进行描述,S-ALE法是在ALE法的基础上,用结构化网格替代非结构化网格,提高了网格划分速度,降低了对计算机内存的需求。

在ALE描述中,除了拉格朗日坐标和欧拉坐标外,还引入了任意的参考坐标。将材料时间导数和参考构型时间导数之间的关系替换为ALE方程

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} - w_i \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} \quad (1)$$

式中, X_i 为拉格朗日坐标, i 为参考坐标, x_i 为欧拉坐标, u_i 和 w_i 为物质速度和参考速度。用 v 表示物体的速度, 用 u 表示网格的速度。为了简化方程, 引入相对速度 $w = v - u$, 因此, ALE公式的控制方程^[17-20]主要有以下几个。

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v}{\partial x_i} - w \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度, t 为时间。

(2) 动量守恒方程

在固定区域内控制牛顿流体流动问题的强形式包括控制方程、合适的初始条件和边界条件。控制流体问题的方程为Navier-Stokes方程的ALE描述

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(\sigma_{ij,j} + \rho b_i) - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中, b_i 为单位体积力, w_i 为 i 方向上的相对速度, $\sigma_{ij,j}$ 为 σ_{ij} 在 j 方向上的偏导。

应力张量 σ_{ij} 描述如下

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

式中, p 为压力, μ 为动力黏度, δ_{ij} 为Kronecker δ 函数。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -(\sigma_{ij}v_{i,j} + \rho b_i v_j) - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中, $v_{i,j}$ 为 v_i 在 j 方向上的偏导, E 为材料内能。

欧拉方程是通过假设参考构型的速度为零推导出来的, 因此, 材料和参考构型之间的相对速度就是材料速度。相对速度的术语通常称为平流术语, 并解释了通过网格的物质的运输。这是方程中的附加项, 使得求解ALE方程在数值上比拉格朗日方程困难得多, 拉格朗日方程中的相对速度为零。

1.2 仿真模型建立

本文选取八门活动幅救生伞为研究对象, 该伞的优点

在于伞衣在伞系统拉直、伞衣底边开始充气时, 活动幅增加了伞衣底边的迎风面, 有利于气流进入伞衣, 加快了开伞过程, 且在伞衣张满稳降过程中, 活动幅增大了迎风面, 使阻力系数加大, 安全性更高。对救生伞仿真模型作如下假设: (1) 模型初始状态的截面为梅花形, 伞衣底部没有封闭, 充气开始后可直接进气; (2) 模型无初始应力; (3) 假人为规则的三维柱体。该伞的三维(3D)模型如图1所示。

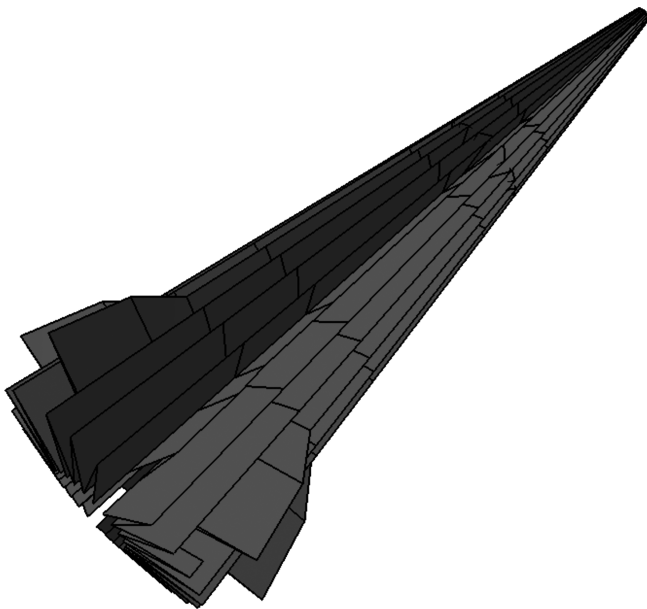


图1 八门活动幅救生伞三维模型图

Fig.1 3D model of the eight-panel canopy lifeline parachute

1.3 网格划分

伞衣主体采用四边形单元, 小部分区域采用三角形网格过渡, 网格总数为400万。流场与伞衣重叠区域加密网格, 使该区域内流场网格与伞衣网格大小比例约为1:1, 加密区向外网格增长率为1.1, 整体网格如图2所示。

1.4 仿真模型验证

为了验证数值仿真结果的可靠性, 选择同为密实织物的C-9平面圆形伞进行仿真验证。C-9伞结构简单, 相关试验数据易于获得, 可以将其仿真数据与试验数据进行对比, 来验证仿真模型的准确性。空投试验C-9伞开伞速度20m/s, 开伞高度2km, 仿真工况和试验保持一致, 将仿真得到的开伞动载和试验数据进行对比, 如图3所示。

从图3中可以看出, 仿真结果与试验曲线趋势一致, 但是仿真结果偏大, 产生误差的主要原因为实际空投试验伞在开伞时的速度方向为水平方向, 会产生一个倾斜角, 而仿真设置速度方向是竖直向下, 并且不考虑实际开伞过程中

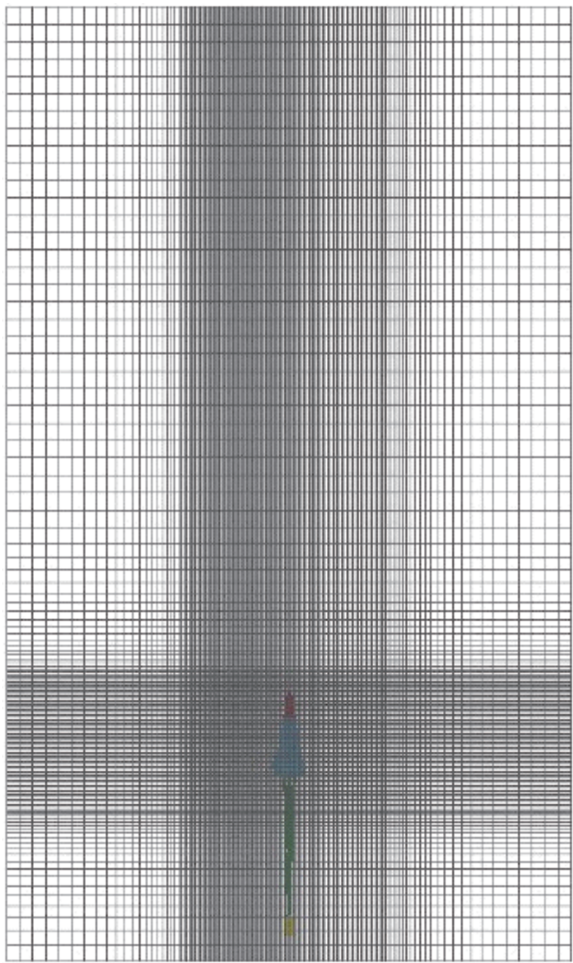


图2 流场网格图
Fig.2 Flow field mesh diagram

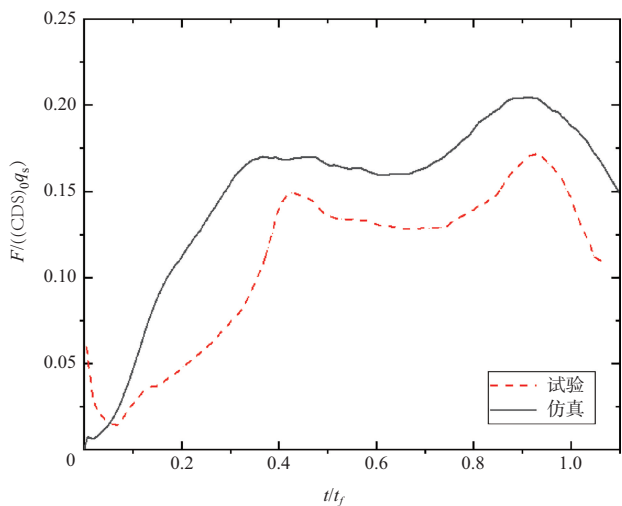


图3 C-9伞开伞动载的仿真与试验对比
Fig.3 Simulation and experimental comparison between parachute opening dynamic load for C-9 parachute

侧风的影响,导致开伞动载偏大。最大误差为17.6%,但是在峰值处的误差均小于10%,对开伞动载的研究主要关心峰值点,因此,认为误差在可接受范围之内,可以基本确定仿真结果的正确性。

2 开伞高度对开伞动载的影响

一般来说,无防护设备的开伞海拔高度不能超过5km,在携带相关设备后跳伞高度可能达到9km,选定海拔高度2km、4km、6km和9km进行开伞过程仿真分析,得到不同海拔高度的开伞动载随时间变化如图4所示,开伞过程相关结果见表1。

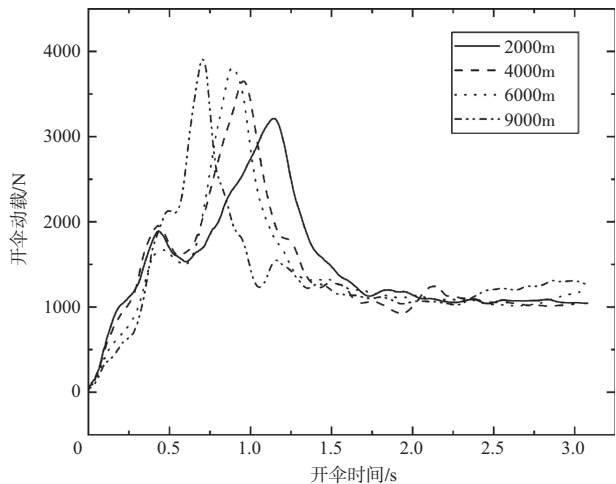


图4 开伞动载随海拔高度的变化
Fig.4 Deployment of parachute and load movement with changes in altitude

表1 不同高度开伞的相关结果
Table 1 Results related to the parachute deployment process at different altitudes

开伞高度/m	最大动载/N	载荷下降速度/(m/s)	最大动载时刻/s	充气时间/s
2000	3256	12.6	1.15	1.4
4000	3682	14.0	0.96	1.14
6000	3884	16.3	0.88	1.06
9000	4050	17.2	0.71	0.82

由图4可以看出,开伞动载会先上升达到第一峰值,随后下降,然后继续上升达到最大值,最后下降趋于水平。第一峰值大小受开伞高度影响不大,但第一峰值后的下降与开伞高度有关,开伞高度越大,下降越不明显,海拔9km高度下开伞,第一峰值几乎消失,动载曲线趋于单峰值。这是因为在高海拔区域,由于空气密度较低,空

气阻力较小,伞的加速度变化较慢,不会出现两个明显的动载峰值。第二峰值远大于第一峰值,且出现时间和数值大小与开伞高度有较为明显的联系。随着开伞高度的增加,第二峰值出现的时间会更早,且数值更大。在达到最大开伞动载之后,动载值会下降,直到趋于同一个稳定值,该值约为伞系统重力大小,这符合伞系统稳定下降时的受力平衡状态。

针对此八门活动幅救生伞得到的开伞动载与开伞高度之间的关系拟合成曲线,发现三次多项式拟合最贴近实际情况,如图5所示,得到的拟合曲线为 $y=2476.63+0.5x-6.03 \times 10^{-5}x^2+2.7 \times 10^{-9}x^3$ 。

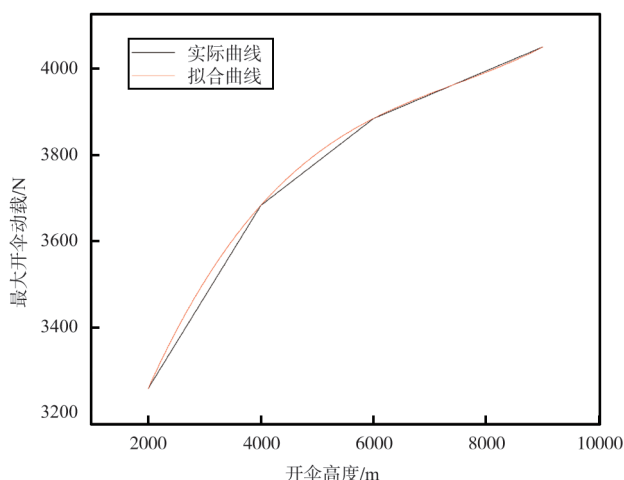


图5 开伞动载拟合曲线图

Fig.5 Fitting curve of the parachute dynamic load

通过分析认为,开伞高度对开伞动载的影响机理如下:(1)高海拔开伞时,伞衣内部压力总体上要低于低海拔开伞,但伞衣膨胀速度更快,一是高海拔开伞时,空气密度低,伞系统下降更快,来流相对速度更大;二是海拔较高时,空气密度降低,伞衣透气性较小,经伞衣流失的空气比例小,伞衣内部高压区对伞衣膨胀做功的效率更高。所以高海拔时开伞更为迅速。(2)不可压缩流中,降落伞充气过程中,认为总的运动距离是一定的,即充满距离只是伞衣直径、伞形、伞衣透气性的函数,而与开伞高度、开伞速度、伞衣负荷均无关。在该前提下,当开伞高度增加时,空气质量密度随之减小,从而引起充气速度增大,充满时间减少,使伞衣张开速率增大,伞衣阻力特征变化曲线斜率增大,降落伞的负加速度增大。在充气过程中,降落伞的阻力变化曲线峰值和随高度增加而增大,从而使最大开伞动载随高度增加而增大。

3 开伞高度对附加质量的影响

3.1 附加质量方法

在伞衣匀速运动的定常计算结果 F_d 之上,运用动网格技术中的动态层方法模拟物体在匀速运动后突然以一恒定加速度在流场中做加速运动,从而带动周围流体一起加速,产生由于物体加速而引起的附加惯性阻力。得出此时物体所受的阻力 F_r ,便能计算得到伞衣的附加质量,其计算表达式如下

$$m = \frac{|F_r - F_d|}{a} \quad (6)$$

本文采用相对运动的思想,通过施加合适的边界条件及在动量方程右侧添加源项的方法进行附加质量的计算。基于动网格技术,将伞衣保持不动,通过给予流体一个加速度来获得非定常流动。这样可以只生成一次网格,提高网格质量并节省计算时间。

由于本方法附加质量力由加速过程和匀速过程伞衣受到的阻力差值获得,最终的附加质量力必然偏大,导致附加质量偏大。所以要采用在动量方程右侧添加源项的方法给流体一个加速度,添加源项后伞衣纵向的动量方程如下

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S \quad (7)$$

式中, ρ 为空气密度; u 为伞衣纵向速度; μ 为动力黏度; p 为压力; S 为添加的源项, $S = -\rho a$, a 为伞衣加速度。通过添加源项,可以使流域前后压力场与实际流动情况一致,避免产生压力差。

3.2 附加质量计算

为计算各开伞高度下开伞动载最大时刻的伞衣附加质量,需要提取该时刻相关运动参数以及伞衣外形。以2km高度开伞为例,伞衣外形和流场域如图6和图7所示,网格总数约320万。

各开伞高度下,最大开伞动载时刻的伞衣附加质量计算结果见表2。非定常运动与定常运动的阻力之差除以加速度即为附加质量。由表2可以看出,随着开伞高度的增大,开伞动载最大时刻的伞衣附加质量逐渐减小,与开伞动载的变化趋势相反,附加质量的变化并不是开伞动载随开伞高度增加而增加的原因;非定常运动阻力和定常运动阻力均为非线性变化,在2~6km的开伞高度范围内变化幅度较小,上升到9km的开伞高度时会有一个较大幅度的减小,二者之间的变化趋势相近;非定常运动阻力和定常运动阻力之间的差值随着开伞高度的增加而不断减小,载荷加速度随着开伞高度的增加而不断增加,共同导致了附加质量随着开伞高度的增加而减小。

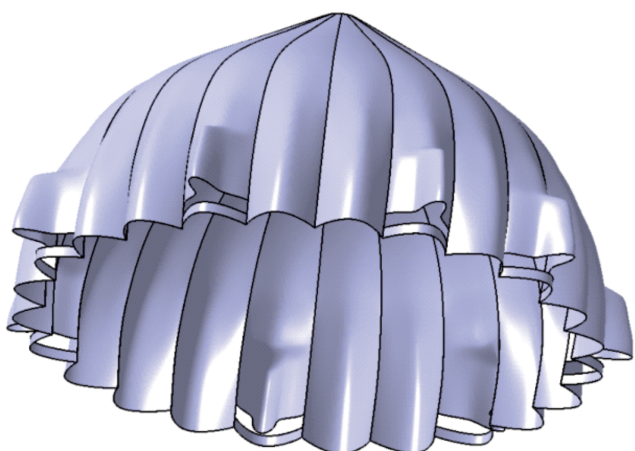


图6 海拔2000m开伞最大动载时刻伞衣几何模型

Fig.6 Geometric model of canopy at the moment of maximum dynamic load at 2000m

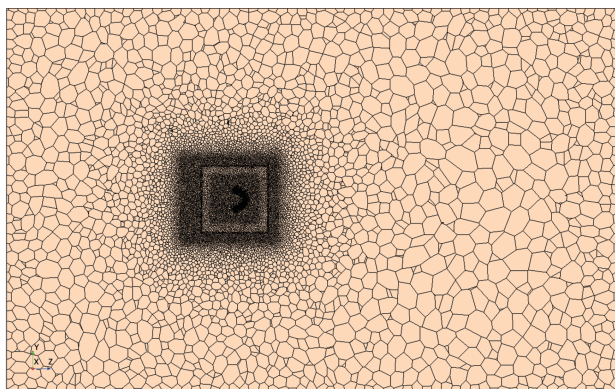


图7 附加质量计算模型流场域

Fig.7 Added mass calculation model flow field

表2 附加质量计算结果

Table 2 Additional mass calculation results

开伞高度/m	非定常运动 阻力/N	定常运动 阻力/N	载荷加速度/ (m/s ²)	附加质量/kg
2000	4223	2273	20.3	96
4000	4199	2285	24.4	78
6000	4238	2495	26.4	66
9000	3270	1966	27.7	47

4 结论

本文基于ALE算法对密实织物伞进行了仿真分析,通过将仿真得到的C-9伞的开伞动载和试验进行对比,验证了仿真方法的可行性,并进一步研究伞形更复杂的八门活动幅救生伞,对其在不同高度的环境下进行有限质量仿真计算,得出不同开伞高度的开伞动载和附加质量,阐明开伞

高度对开伞动载的影响机理,并分析附加质量对开伞动载的影响,得出以下结论:

(1)随着开伞高度的增加,最大开伞动载会增加并且达到最大开伞动载的时间会变短。

(2)随着开伞高度的增加,附加质量不断减小,附加质量不是影响开伞动载随开伞高度增加的原因。

(3)开伞动载对开伞高度增加的原因:在不可压缩流中,充满距离只是伞衣直径、伞形、伞衣透气性的函数,而与开伞高度、开伞速度、伞衣负荷均无关。在该前提下,当开伞高度增加时,空气质量密度随之减小,从而引起充气速度增大,充满时间减少,使伞衣张开速率增大,伞衣阻力特征变化曲线斜率增大,降落伞的负加速度增大。在充气过程中,降落伞的阻力变化曲线峰值和随高度增加而增大,从而使最大开伞动载随高度增加而增大。

(4)开伞速度随开伞高度增加的原因:高海拔开伞时,空气密度更低,来流相对速度更大,伞系统下降更快,且伞衣透气性较小,经伞衣流失的空气比例小,伞衣内部高压区对伞衣膨胀做功的效率更高。

AST

参考文献

- [1] Ibos C, Lacroix C, Chuzet L, et al. SINPA, a full 3D fluid structure software for parachute simulation [J]. AIAA Journal, 1997, 91:313-323.
- [2] Tutt B, Taylor A. The use of LS-DYNA to simulate the inflation of a parachute canopy[C]. 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005: 1608.
- [3] 高兴龙, 张青斌, 高庆玉, 等. 有限质量降落伞充气动力学数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2016(4):185-190.
Gao Xinglong, Zhang Qingbin, Gao Qingyu, et al. Numerical simulation of parachute inflation dynamics with finite mass [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016 (4): 185-190. (in Chinese)
- [4] 吕伯平, 王璐, 王伟, 等. 某圆周缝型救生伞的充气性能研究[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6):21-27.
Lyu Boping, Wang Lu, Wang Wei, et al. A study on the inflatable performance of a circular-slit life-saving umbrella [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(6): 21-27. (in Chinese)
- [5] 冯传奇, 刘浩, 孙建, 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.

- Feng Chuanqi, Liu Hao, Sun Jian, et al. Study on the inflation process of heavy airdrop parachute based on ALE method [C]. China Mechanics Congress, 2019. (in Chinese)
- [6] 官本和. 基于 ALE 的某救生伞开伞过载研究[C]. 2019 年(第 4 届)中国航空科学技术大会, 2019: 869-875.
- Guan Benhe. Research on the opening overload of a life-saving parachute based on ALE [C]. 2019 (4th) China Aviation Science and Technology Conference, 2019: 869-875. (in Chinese)
- [7] 荣伟, 陈旭, 陈国良. 大气密度对降落伞充气性能的影响[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(3):11-16.
- Rong Wei, Chen Xu, Chen Guoliang. Effect of atmospheric density on parachute inflation performance [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27 (3): 11-16. (in Chinese)
- [8] Kalro V, Tezduyar T E. A parallel 3D computational method for fluid structure interactions in parachute systems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 190(3-4): 321-332.
- [9] 聂德新, 张龙臻. 影响救生伞开伞过载因素的分析[C]. 中国航空学会人体工程、航医、救生专业委员会第 6 届学术年会, 2003.
- Nie Dexin, Zhang Longzhen. Analysis of the factors affecting the opening overload of life-saving parachute[C]. 6th Academic Annual Meeting of the Professional Committee of Human Engineering, Aeronautical Medicine and Life-saving of China Aeronautical Society, 2003. (in Chinese)
- [10] 龚文轩. 降落伞开伞高度对开伞动载影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 1996(3):39-45.
- Gong Wenxuan. Analysis of the influence of parachute opening height on parachute opening dynamic load [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1996(3): 39-45. (in Chinese)
- [11] 龚文轩. 一种计算开伞动载的实用方法[J]. 中国空间科学技术, 1995(1):36-46.
- Gong Wenxuan. A practical method for calculating the dynamic load of parachute opening [J]. China Space Science and Technology, 1995(1) : 36-46. (in Chinese)
- [12] Usbaldo F, Dearman J, Morris A. Proposed framework for determining added mass of orion drogue parachutes[R]. NASA 2011-2546, 2011.
- [13] Elgabaili M, Kenneth J D. Added mass of a model round parachute canopy during inflation[R]. AIAA 2013-1321, 2013.
- [14] Brook A K. Parachute drag area using added mass as related to canopy geometry[C]. 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2009: 4-7.
- [15] 龚文轩. 降落伞附加质量与开伞动载[J]. 航空学报, 1995, 16(1):85-87.
- Gong Wenxuan. Parachute added mass and parachute opening dynamic load [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995, 16(1): 85-87. (in Chinese)
- [16] 黄伟. 降落伞附加质量的计算方法[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(2) :42-50.
- Huang Wei. Calculation method of parachute additional mass [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(2): 42-50. (in Chinese)
- [17] Tanaka S, Kashiya K. ALE finite element method for FSI problems with free surface using mesh re-generation method based on background mesh[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2006, 20(3-4): 229-236.
- [18] Souli M, Ouahsine A, Lewin L. ALE formulation for fluid-structure interaction problems[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2000, 190(5-7): 659-675.
- [19] 辛春亮, 涂建, 王俊林, 等. 由浅入深精通 LS-DYNA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- Xin Chunliang, Tu Jian, Wang Junlin, et al. Mastering LS-DYNA from Beginner to Advanced [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019. (in Chinese)
- [20] Tutt B, Taylor A. The Use of LS-DYNA to Simulate the Inflation of a Parachute Canopy[C]. AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference & Seminar. 2005.

Research on the Impact of Opening Height on Parachute Dynamic Load and Added Mass of Rescue Umbrellas

Chen Jie, Zhang Hongying, Zhang Yuchen

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: A large number of airdrop experimental data from both domestic and international sources indicate that the opening dynamic load of compact fabric circular parachutes, such as the eight-panel canopy parachute and C-9 parachute, is closely related to the opening altitude. Currently, methods for studying the parachute opening process through fluid-structure interaction (FSI) are quite common. However, research on the influence of opening altitude on the opening dynamic load is not very deep. This paper conducts a numerical simulation of the opening process of the C-9 parachute using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method, and compares the simulated opening dynamic load with experimental data to verify the reliability of the simulation method. Furthermore, by studying the opening process of the eight-panel canopy parachute at different altitudes, the paper analyzes the opening dynamic load and added mass, clarifying the mechanism of how opening altitude affects the opening dynamic load and whether the added mass has a significant impact on the dynamic load. The conclusions from the simulation show that as the opening altitude increases, the opening dynamic load increases while the added mass decreases, providing theoretical support for the design of load limits for parachutes at different altitudes.

Key Words: lifesaving parachute; fluid-structure interaction; opening height; opening load; added mass

Received: 2024-09-29; **Revised:** 2024-12-10; **Accepted:** 2025-02-17

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20200029052004)