

降落伞充气过程中“瓶颈”效应*

程 涵¹, 余 莉¹, 夏 刚²

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016;
2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:以大型伞或特大型伞为研究对象,采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)流固耦合方法模拟某载人飞船主伞(环帆伞)在无限质量情况下的充气展开过程。计算获得了充气过程中,伞衣外形和流场之间的动态关系,数值模拟出非对称充气、伞顶甩打等不良充气现象,提出了充气过程存在“瓶颈”效应,通过大量的实物试验验证该效应的存在。通过结果分析发现“瓶颈”效应实质是由于伞衣面积大,伞衣结构复杂或开伞速度过大导致气团进入伞体受阻造成的,但其产生的具体必要条件尚有待进一步研究。结论对了解降落伞工作机理,防止开伞失效有重要意义。

关键词:降落伞;充气过程;ALE方法;流固耦合

中图分类号: V244.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)01-0048-05

A study on “bottleneck” phenomenon during parachute inflation

CHENG Han¹, YU Li¹, XIA Gang²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The inflation process of large-scale or extra large-scale parachute was investigated. The Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Method-a Fluid-Structure Interaction (FSI) model, was used to simulate the inflation process of a main parachute (a ringsail parachute, which was used in manned spacecraft) in an infinite mass situation. The dynamic relationship between canopy shape and flow field was obtained, and the adverse inflation phenomena such as asymmetric inflation and whip were observed in simulation results. The “bottleneck” phenomenon in inflation process was found and verified by physical tests. Based on the analysis of calculation results, it is found that the large canopy area, the complicated canopy structure or high inflation speed can block the air mass into the parachute, which can cause the “bottleneck” phenomenon. But the necessary occurrence conditions of the phenomenon need to be studied in future. The present work is significant for explaining parachute working mechanism and preventing its failure.

Key words: parachute; inflating process; arbitrary lagrangian eulerian; method-a fluid-structure interaction

大型伞或特大型伞一般具有名义面积大、开伞条件恶劣、充气时间长的特点,充气过程中,容易发生非对称充气、伞顶甩打、破损等失效现象。而大型伞或特大型伞减速系统一般采用非冗余设计,一旦失效,往往造成不可估计的损失^[1]。因此,降落伞减速技术往往是返回系统中的重点研究内容。

目前,主要研究手段主要基于空投试验或风洞试验,但试验资金投入大、周期长、受外界干扰大、数据采集有困难,由于试验的这些局限性,较难解释降落伞失效机理。而数值模拟以其经济性和灵活性成为最有可能揭示降落伞失效机理的手段。近几年,基于气弹理论的新型耦合模型成为

降落伞充气过程研究的重点和热点,代表性的有:2009年,Peskin等采用IB法(Immersed Boundary Method)计算了三维模型伞在低速低雷诺数情况下开伞情况^[2],但没有伞衣应力等结果,和实际工程应用尚有一定距离;2011年,Ben等基于ALE法进行了有限质量情况下的开伞过程的初步研究^[3],获得了流场和结构变化结果。但上述研究中,其研究对象是结构较简单的模型伞,并做了大量的简化,如忽略了加强带、收口绳等细节,没有对降落伞失效问题深入研究,大型或特大型伞充气过程研究及其失效机理分析极少有公开文献。国内研究学者也做了大量的充气过程研究,取得了较大的成果^[4-7],但三维充气过程研究还

* 收稿日期:2012-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172137);航空科学基金项目(20122910001)

作者简介:程涵(1984—),男,江苏无锡人,博士研究生,E-mail: chenghanstorm@sina.com;

余莉(通信作者),女,教授,博士,博士生导师,E-mail: yuli_happy@163.com

处于摸索阶段。

本文针对某飞船回收主伞开伞特点进行了无限质量情况下充气数值研究,与有限质量情况计算相比,虽然无法获得减速特性,但计算域小,计算量少,更加有利于失效分析。通过计算,本文获得充气过程中结构应力、流场、外形等动态数据,提出了充气过程中的“瓶颈”效应,并通过实物试验和其他案例验证该效应的存在。本文的研究成果对大型伞或特大型伞设计、优化有一定的指导意义。

1 数学模型

本文采用 ALE 方法对降落伞进行开伞过程流固耦合计算,其控制方程及耦合原理如下^[8-12]:

(1)流场控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + s$$

其中, ϕ 为通用变量, Γ 为广义扩散系数, s 为源项,对于连续、动量方程分别为: $\phi = 1, v_i; \Gamma = 0, \mu$

$$+ \mu_i; s = 0, -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial v_j}{\partial x_i})$$

网格控制方程为:

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + w_i \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t}$$

X_i 表示拉格朗日坐标; x_i 表示欧拉坐标。

(2)结构域控制方程:

$$\rho^s \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sigma_{ij,j} + \rho^s b_i$$

式中 u_i 表示结构域中节点位移; σ_{ij} 表示应力张量; ρ^s 表示结构密度; b_i 表示单位体积力。

(3)流固耦合实现:

对上述控制方程进行全耦合计算,采用中心差分法时间显式法进行求解。其中,流场域和结构域的速度和位移分别按以下等式更新:

$$u^{n+1/2} = u^{n-1/2} + \Delta t \cdot M^{-1} \cdot (F_{ext} + F_{int})$$

$$x^{n+1} = x^n + \Delta t u^{n+1/2}$$

式中 F_{int} 为内力矢量, F_{ext} 为外力矢量,它们与体力

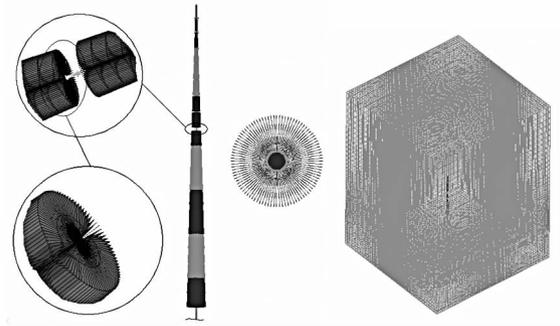
和边界条件相关联, M 为质量对角矩阵。

本文采用罚函数进行结构与流场的耦合,根据耦合点距离 d 计算界面力 $F_c (F_c = k \cdot d)$,其中 k 为刚度系数),将 F_c 作为外部力 F_{ext} 的一部分,对耦合区域的速度、位移进行调整。

2 仿真模型

本文的计算按照实物等比建模:伞衣幅数为 96 块,环幅数为 8,帆幅数为 12(由于篇幅关系,环帆伞各部件材料属性不一一例举),各幅均考虑织物透气量影响。

计算时,假设伞绳、伞衣完全拉直,俯视伞衣呈星状;伞绳连接点固定,伞系统为无限质量充气情况。流场入口为速度入口边界,其余流场边界采用无反射边界,来流速度为 100m/s;整个仿真模型在划分网格时采用壳单元划分伞衣(9 万单元),绳索单元划分伞绳(3 万单元),用六面体单元划分流场(65 万单元),其中伞衣、伞绳单元穿插于流场网格中,有限元模型如图 1 所示,使用曙光天阔 I650R-F 服务器计算达 700h 之久。



(a)伞衣模型

(b)降落伞与流场

(a) Canopy model

(b) Parachute and flow field

图 1 降落伞有限元模型

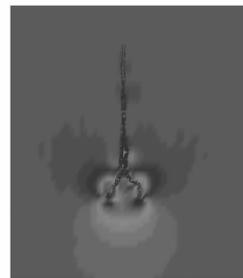
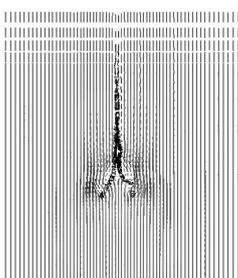
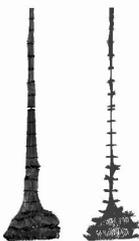
Fig. 1 Finite element model of parachute

3 数值结果及验证

3.1 数值计算结果与分析

图 2 为数值计算中开伞过程的等效力及结构、流场速度、压力变化结果图。

1. $t=0.1s$



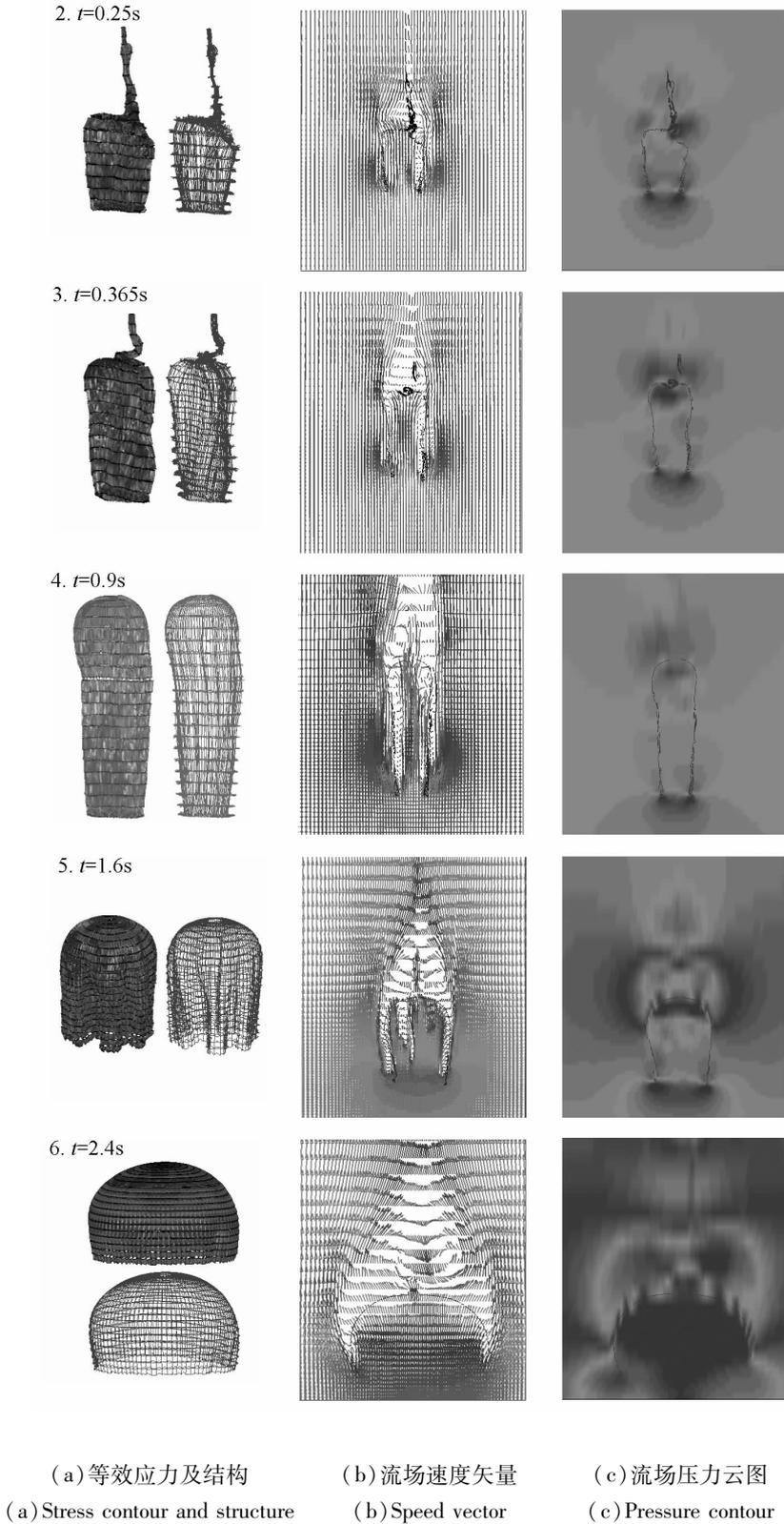


图 2 充气过程

Fig. 2 Inflating process

数值仿真与实际开伞程序相同,整个过程以收口绳解除为界分为三个阶段:预充气阶段、收口阶段和充分充气阶段。

第一阶段:预充气阶段(0~0.9s)

伞衣底部充气,并形成“瓶颈”(图 2(a)1);之

后,由于柔性织物的结构特性,在“瓶颈”处产生非对称充气,并出现扭转现象(图 2(a)2);非对称充气、扭转与“瓶颈”效应相互影响,伞顶开始发生甩打,伞衣底部受力明显不均(图 2(a)3);“瓶颈”移动至伞顶消失后,非对称充气、扭转、甩打、

伞衣底部受力不均等现象逐渐消失(图2(a)4)。

“瓶颈”效应只是阻碍气团进入伞衣,但没有约束伞衣运动,因此在进入伞衣的气团在“瓶颈”处形成高压区,并推动“瓶颈”向伞顶发展,伞衣底部缺乏约束造成伞衣卷边,形成了高压区,伞衣周向内外压差很小(图2(c)1~(c)4);伞衣顶部外流场分离现象逐渐明显,内部气流以向上运动为主,呈非对称性(图2(b)1~(b)3),但随着伞顶的完全展开,伞顶外部对称涡结构逐渐形成并增强,内部气流速度逐渐降低,伞顶处的气流开始向四周流动(一部分从伞顶孔流出),内部涡逐渐形成(图2(b)4);伞衣应力分布与流场情况相对应,应力集中区域出现在伞衣内外流场压差较大的地方,如“瓶颈”处和伞衣底部(图2(a)1~(a)4)。

第二阶段:收口阶段(0.9s~0.97s)

0.9s后伞形变化不大并保持稳定,并在0.97s时解除收口。该阶段伞衣出现规则的呼吸现象,流场特性及应力分布变化不大。

第三阶段:充分充气阶段(0.97s~2.4s)

此时,伞衣底边收口绳被解除,伞衣从伞顶至伞底快速充满,部分月牙缝甚至起了进气口作用(图2(b)5),该阶段充气过程平稳;外型由“乌贼”状态变为半球状,中下部伞衣由松弛(图2(a)5)渐渐变为饱满(图2(a)6),月牙缝完全展开。

伞顶内部高压区开始逐渐加大,最终与伞衣底部高压区连成一片,伞顶外部的对称负压区明显(图2(c)5~(c)6),伞衣内外形成稳定压差,伞衣完全张满;同时,伞衣内部流场速度降低,随伞衣的完全展开,原有的内部涡逐渐消失,而外部流场涡逐渐增大(图2(b)5~(b)6);最大应力始终出现在伞顶,随着帆幅的展开出现了明显的“鱼鳞”状应力分布(图2(a)6)。

3.2 “瓶颈”效应验证

图3为某载人飞船主伞的空投试验情况,从图中可以发现明显的“瓶颈”效应,并存在不严重的非对称充气,由此可以证明本文所提的“瓶颈”效应是客观存在的。

“瓶颈”效应不仅仅出现在大型伞的充气展开过程,普通救生伞在高速开伞时也经常出现“瓶颈”现象,从图4中可以明显地看到“瓶颈”效应以及由此产生的伞顶甩打。

通过上述计算和试验,证实了“瓶颈”效应的存在,该效应将导致非对称充气、伞顶甩打甚至伞衣扭转,从而造成开伞失效。“瓶颈”效应实质是

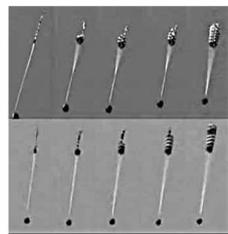


图3 实物试验中的“瓶颈”效应

Fig.3 “Bottleneck” phenomenon in test

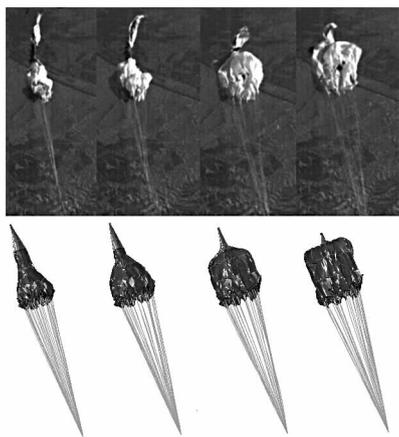


图4 某救生伞高速空投试验与计算对比
(开伞速度为150m/s)

Fig.4 Comparison of test and calculation
(snatch speed is 150m/s)

由于伞衣面积大,伞衣结构复杂或开伞速度过大导致气团进入伞体受阻造成的,但是,其产生的具体必要条件尚有待进一步研究。“瓶颈”效应的实质,决定了大型伞开伞过程中该效应不可避免,但它可能带来的失效是可以预防的,常用的预防手段如牵顶伞和伞衣保护布^[13-14],在实际工程中起着良好的效果^[15]。

4 结论

本文采用基于ALE方法对某载人飞船主伞充气过程进行了仿真,采用实物试验验证结论的正确性。

(1)充气过程中将出现“瓶颈”效应,从伞衣底向伞顶移动,并逐渐加剧,直至伞顶完全瞬间充满,“瓶颈”消失;

(2)“瓶颈”能够引起非对称充气、伞顶甩打和伞衣扭转等不良充气现象,从而大大增加降落伞失效几率;

(3)“瓶颈”效应的提出为预防降落伞充气失效提供理论依据。

本文的研究成果对改进降落伞设计,预防降落伞失效,提高降落伞设计水平有一定指导意义,对

其他织物工作过程研究也有一定的借鉴意义,但“瓶颈”效应出现的必要条件还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 夏刚,程文科,秦子增. 航天器回收中几种主伞失效案例介绍[J]. 航天返回与遥感,2002,23(4):4-8.
XIA Gang, CHENG Wenke, QIN Zizeng. Case study of main parachute malfunction in aerospace recovery[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2002,23(4):4-8. (in Chinese)
- [2] Kim Y S, Peskin C S. 3 - D Parachute simulation by the immersed boundary method[J]. Computers and Fluids,2009,38: 1080 - 1090.
- [3] Tutt B, Roland S, Charles R D, et al. Finite mass simulation techniques in LS-DYNA[R]. AIAA - 2011 - 2592, 2011.
- [4] 彭勇,张青斌,秦子增. 降落伞主充气阶段数值模拟[J]. 国防科技大学学报,2004,26(2):13-16.
PENG Yong, ZHANG Qingbin, QIN Zizeng. Simulation of parachute final inflation phase [J]. Journal of National University of Defense Technology,2004,26(2): 13 - 16. (in Chinese)
- [5] 王侃,曹义华,于子文,等. 降落伞流固耦合问题的数值模拟和流场分析. 北京航空航天大学学报[J]. 2007,33(9): 1029 - 1031.
WANG Kan, CAO Yihua, YU Ziwen, et al. Numerical simulation of parachute fluid-solid coupling problem and flow analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(9): 1029 - 1031. (in Chinese)
- [6] Yu L, Ming X. Study on transient aerodynamic characteristics of parachute opening process [J]. Acta Mechanica Sinica, 2007,23(6): 627 - 633.
- [7] 郭鹏,夏刚,秦子增. 基于控制体积方法的降落伞初始充气模型[J]. 航天返回与遥感,2011,31(6):1-8.
GUO Peng, XIA Gang, QIN Zizeng. Numerical simulation of parachute initial inflation phase based on control volume method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2011,31(6):1-8. (in Chinese)
- [8] Souli M, Ouahsine A, Lewin L. ALE formulation for fluid-structure interaction problems [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering,2000,190: 659 - 675.
- [9] Casadei F, Halleux J P, Sala A, et al. Transient fluid-structure interaction algorithms for large industrial applications [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering,2001,190: 3081 - 3110.
- [10] Gong W J, Wang J M, Gao N. Numerical simulation for abrasive water jet machining based on ALE algorithm [J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2011,53: 247 - 253.
- [11] Tallec P L, Mouro J. Fluid structure interaction with large structural displacements [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering,2001,190:3039 - 3067.
- [12] Zhang Q, Toshiaki Hisada. Analysis of fluid-structure interaction problems with structural buckling and large domain changes by ALE finite element method [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2001, 190: 6341 - 6357.
- [13] Delurgio P R. Evolution of the ringsail parachute[R]. AIAA - 1999 - 1700, 1999.
- [14] Talor A P, Sinclair R J, Allamby R D. Design and testing of the Kistler landing system parachutes [R]. AIAA - 1999 - 1707,1999.
- [15] 李健,唐明章. “神舟八号”飞船主伞的改进设计与试验 [J]. 航天返回与遥感,2011,32(6):36-32.
LI Jian, TANG Mingzhang. Improvement and tests of the Shengzhou-8 main parachute [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011,32(6):36-32. (in Chinese)