

# 基于 ALE 的降落伞充气过程数值仿真

程 涵<sup>1</sup> 余 莉<sup>1</sup> 李胜全<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 中国航空研究院 609 所, 南京, 211102)

**摘要:**采用任意拉格朗日-欧拉法(Arbitrary Lagrange Euler method, ALEM)流固耦合方法模拟某模型伞在低速气流作用下充气展开过程。计算获得了充气过程中伞衣应力、流场速度矢量、压力以及伞衣半径变化等结果。与试验对比,开伞过程相同,同样出现了伞衣顶部塌陷、抖动等现象。通过对数值结果的分析解释了伞衣抖动以及风洞试验中伞底拍动产生巨大噪声的原因,同时预测开伞过程中的危险截面。

**关键词:**气动减速器;开伞过程;任意拉格朗日-欧拉法;无限质量

**中图分类号:**V244.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)03-0290-04

## Numerical Simulation of Parachute Inflation Process Based on ALE

Cheng Han<sup>1</sup>, Yu Li<sup>1</sup>, Li Shengquan<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;  
2. Research institute No. 609, Chinese Aeronautical Establishment, Nanjing, 211102, China)

**Abstract:** The parachute opening process in low-speed airflow is simulated based on ALE method. The numerical results of the structural stress, the velocity vector, the pressure contour of flow field, the diameter change of canopy and so on are obtained. Compared with the test, the opening processes are the same, and the phenomenas of top sink and canopy shake are observed. Finally, the mechanical mechanism explanation of canopy shake and the huge noise caused by canopy flapping in tests, and the prediction of dangerous section during opening are given by the analysis based on numerical results.

**Key words:** aerodynamic decelerator; opening process; arbitrary Lagrange Euler method (ALEM); infinite mass

降落伞以重量轻、减速效果好等特点在航空、航天以及兵器等领域有着广泛的应用。而国内降落伞设计主要基于经验和半经验公式,需要通过大量的实物试验来验证,但是这种方式不仅耗费大量人力物力,更重要的是延长了研制周期,不利于发现降落伞的工作机理,于是会出现设计、试验成功,实际运用失效,再试验又成功的现象。而数值模拟方法以其经济性、灵活性等特点在降落伞开伞研究中开始得到应用。

降落伞折叠展开表象上简单,但是其力学机理极为复杂,是一个典型的流固耦合、强非线性时变系统:柔性织物在内、外流场的作用下发生急剧大变形,这是一个几何非线性与材料非线性并存的瞬

间大变形结构动力学问题;而伞衣内外流场也十分复杂,伞衣内部为显著的湍流状态,外部存在严重的分离现象<sup>[1-2]</sup>。在国外,一些著名的流固耦合领域的权威都用降落伞工作过程计算来验证其数值模型的可靠性和准确性,降落伞工作机理之复杂可见一斑。国外早在 20 世纪 80 年代就开始采用气动-结构相互作用机理来研究降落伞的充气过程。具有代表性的工作有: Purvis 利用简化的伞衣结构模型和伞衣内部流体运动模型<sup>[3]</sup>,初步实现了形状和伞衣内部流场的二维耦合计算,然而这种模型较为粗糙,对阻尼系数较为敏感;1993 年,Stein, Benney 等人提出了降落伞 CFD 和质点弹性阻尼(Mass-spring-damper, MSD)的耦合模型<sup>[4-5]</sup>,忽略织物

基金项目:国家自然科学基金(11172137)资助项目。

收稿日期:2011-07-15;修订日期:2012-01-30

通讯作者:余莉,女,教授,博士生导师,1969 年出生,E-mail:yuli-happy@163.com。

结构特性的影响,且未和试验进行对比;2005年起,Tutt 等人采用任意拉格朗日-欧拉法(Arbitrary Lagrange Euler method, ALEM)模拟了三维降落伞开伞过程<sup>[6-7]</sup>,并与试验结果进行了对比,获得了成功;2009年,Peskin 等人采用浸入边界法(Immersed boundary method, IBM)计算了三维模型伞开伞情况,但无法获得伞衣应力应变等情况<sup>[8]</sup>;2012年,Takizawa 等人用稳定空域流固耦合法计算了降落伞稳降时的结构和流场情况,但没有计算完整的开伞过程<sup>[9-10]</sup>。目前,国内对开伞过程研究大多停留在二维水平,三维研究还处于摸索阶段<sup>[11]</sup>,开伞过程中的三维流场动态分布还是一片空白,耦合模型也没有考虑织物的应力和应变,无法反映织物充气时的力学性能。因此,采用流场-结构动力学耦合模型,全面得到开伞过程的三维动态特性对提高降落伞分析水平有着非常重要的意义。

本文采用 ALE 方法对某降落伞进行仿真研究,获得开伞过程中结构应力、流场、外形、动载等动态数据,研究了开伞过程中结构和流场变化规律。该方法可以获得开伞过程中较为全面的流场-织物结构信息。

## 1 计算模型

### 1.1 数学模型

针对降落伞进行开伞计算仿真,本文采用了 ALE 方法进行流固耦合计算,其控制方程及耦合原理如下:

(1)流场控制方程为

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

式中: $\phi$ 为通用变量; $\Gamma$ 为广义扩散系数; $s$ 为源项。

对于连续、动量方程分别为: $\phi=1, v_i; \Gamma=0, \mu+\mu_i;$

$$s=0, -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)。$$

网格控制方程为

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

式中: $X_i$ 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; $\rho^s$ 表示结构密度。

(3)流固耦合实现

对上述控制方程进行全耦合计算,采用中心差分法按时间递增进行求解,中心差分法采用时间显式法,提供二阶时间精度,对结构和流场的速度、位移按以下等式更新。

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

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

式中: $F_{\text{int}}$ 为内力矢量, $F_{\text{ext}}$ 为外力矢量,它们与体力与边界条件相关联; $M$ 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 $F_{\text{ext}}$ 的一部分,对耦合区域的速度、位移进行调整,从而实现耦合。

### 1.2 仿真模型

本文的计算模型为无任何透气量的平面圆形伞:伞衣幅数为8块,伞绳长750 mm,伞衣总面积为 $A=0.78 \text{ m}^2$ ,伞绳弹性模量为 $9.7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,密度为 $462 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,伞衣弹性模量为 $4.3 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,密度为 $533 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,泊松比0.14。

计算时,假设伞绳、伞衣完全拉直,俯视伞衣呈杨桃状;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出流模拟,来流速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;整个仿真模型在划分网格时采用 BT 壳单元划分伞衣,绳索单元划分伞绳,用六面体单元划分流场,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。

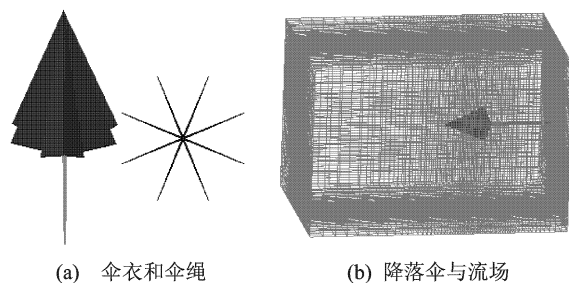


图1 降落伞有限元模型

## 2 计算结果验证

为了验证本文的数值计算结果,进行了风洞试验验证,伞衣折叠置于伞箱内(图2),控制机构拉出销子的同时,数采系统、高速摄像机同时开始工作,至282 ms伞衣开始充气,数值计算结果和试验结果比较如图3所示,其中图3(a~f)为计算结果,

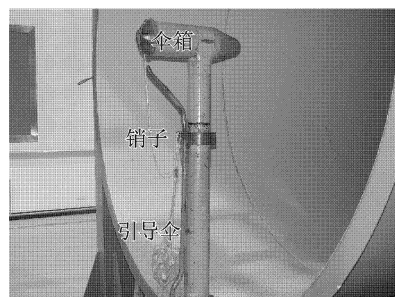


图2 试验装置

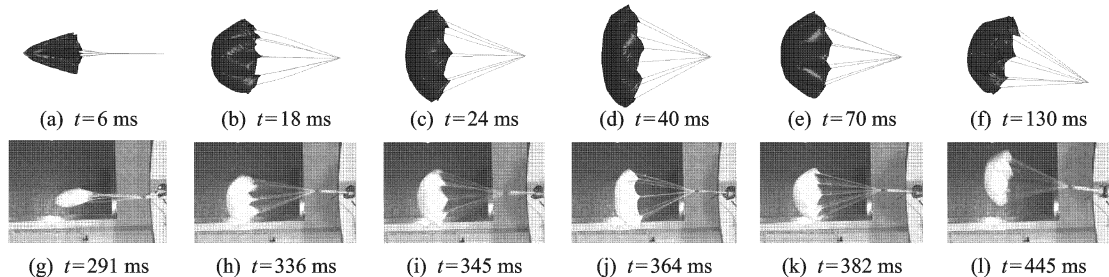


图3 计算与试验充气过程对比

图3(g~l)为相对应的试验结果。由于试验中风洞紊流度、机械振动、伞衣重力等因素的影响,试验开伞时间略长于数值结果,但两者外形变化规律基本一致。由此可知,本文的数值仿真结果能够反映降落伞展开后充气过程的变化。

### 3 计算结果分析

图4为数值计算中开伞过程的等效应力、流场速度、压力变化结果图。

从图4中可以发现,当伞绳与伞衣处于完全拉直的理想状态时,伞衣充气展开主要分为3个阶段:预充气阶段(0~12 ms)、充分充气阶段(12~75 ms)、充满后工作阶段(75 ms之后)。

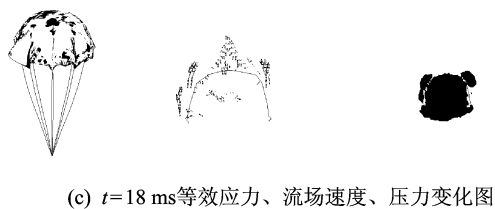
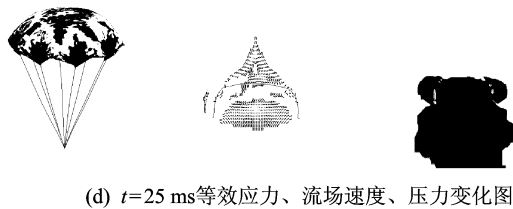
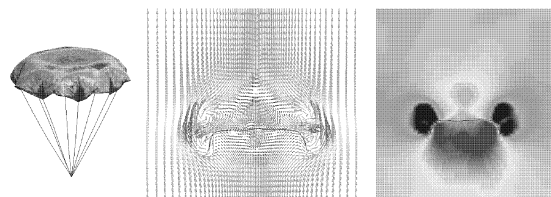
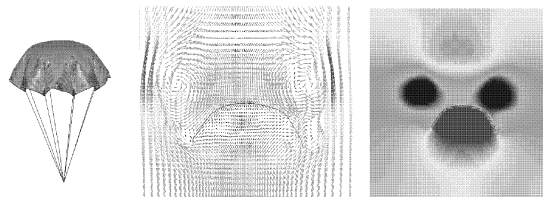
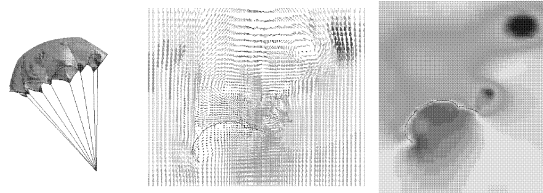
(a)  $t=8$  ms等效应力、流场速度、压力变化图(b)  $t=12$  ms等效应力、流场速度、压力变化图(c)  $t=18$  ms等效应力、流场速度、压力变化图(d)  $t=25$  ms等效应力、流场速度、压力变化图(e)  $t=38$  ms等效应力、流场速度、压力变化图(f)  $t=70$  ms等效应力、流场速度、压力变化图(g)  $t=150$  ms等效应力、流场速度、压力变化图

图4 开伞过程结构、流场结果

预充气阶段:伞内少量空气聚集导致伞顶内部逐渐形成高压区(图4(a,b)右)及对称涡(图4(b)中),并从伞顶加速扩大至伞底,带动伞底迅速膨胀;应力产生区域也随之由伞顶扩大到整个伞衣,但是伞衣和伞绳链接处始终是整个充气过程中最大应力集中区。此外,伞衣底部由于束缚较少容易形成伞衣卷边,加剧流场不稳定(图4(b)右),容易造成局部应力集中。

充分充气阶段:伞顶内部对称涡开始破裂,内部气流速度逐渐变小并绕伞衣底边流出,伞底边缘的对称涡变强并向上方运动(图4(c~f)中);伞衣外部负压区也随对称涡移动和扩大,伞内压力变得很大且几乎相等,在伞衣底部形成较大压力梯度(图4(c~f)右);该阶段伞衣充分展开至25 ms时,受伞绳的束缚,伞衣加速展开过程中突然受阻,导致伞内压力剧增(图4(d)右),此时伞衣动载达到最大值

(图5),伞衣表面所受应力达到最大(图4(d)左),随后伞衣在气弹力作用下发生顶部塌陷(图4(e)左),并逐渐回弹。

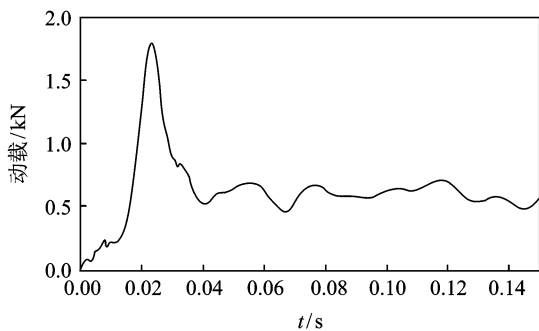


图5 降落伞动载

充满后工作阶段:伞衣应力区域稳定,伞衣出现有规律的呼吸现象,呼吸频率及幅值逐渐降低(图6);但该阶段出现降落伞整体随机摆动,伞中心轴线摆动角度在 $45^\circ$ 之内(图4(g)左);原先在伞顶上方的对称涡变得极不稳定,逐渐脱离或消失,在相对较高的伞底边缘外部逐渐产生新的涡并向上方运动,而较低边缘内部同样出现一新涡(图4(g)中);在不对称涡和压差作用下,伞衣向其他方向摆动,摆动至其他位置时也会在相应部位产生非对称涡,但其大小和发展趋势不确定,这也是降落伞会产生绕固定点打转、前后、或左右随机摆动的原因。

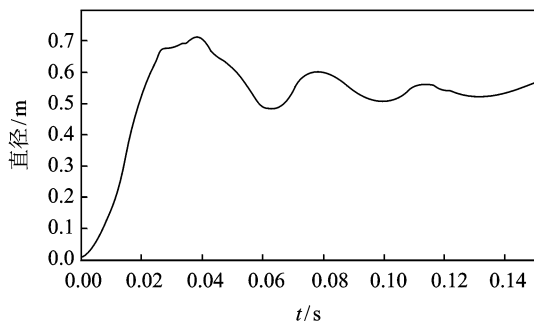


图6 投影直径变化

## 4 结 论

本文采用基于 ALE 方法对某降落伞充气过程进行了仿真,用风洞试验验证了计算结果的可靠性,对结构、流场动态数据进行分析,得到了以下结论:

(1)降落伞在充气过程中,伞顶首先充气,随着伞衣的展开,伞衣顶部将出现仅有的一次塌陷,回弹后开始出现呼吸状抖动,逐渐趋于平稳。

(2)伞衣应力主要集中在伞绳与伞衣连接处及伞衣折痕展开时;当动载达到极值时,伞衣表面应力也最大,往往伞衣在此过程中容易发生破损。

(3)伞衣充满后发生摆动,伞底边缘内部及外

部出现的非对称涡,是造成随机摆动的原因;同时,伞底压力梯度大造成伞底流场不稳定,是伞底不断抖动、拍打及产生噪音的原因。

采用 ALE 方法的流固耦合模型可以较准确获得瞬态流场变化以及应力、应变及形状变化情况,通过对这些数据的分析以改进降落伞设计,预防降落伞失效,提高降落伞设计水平。

## 参考文献:

- [1] Li Yu, Xiao Ming. Study on transient aerodynamic characteristics of parachute opening process[J]. Acta Mechanica Sinica, 2007,23(6):627-633.
- [2] 余莉,史献林,明晓.降落伞充气过程的数值模拟[J].航空学报,2007,28(1):52-57.  
Yu Li, Shi Xianlin, Ming Xiao. Numerical simulation of parachute during opening process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007,28(1):52-57.
- [3] Purvis J W. Theoretical analysis of parachute inflation including fluid kinetics [R]. AIAA 81-1925, 1981.
- [4] Stein K R, Benney R J, Steeves E C. A computational model that couples aerodynamic structural dynamic behavior of parachutes during the opening process[R]. NASA-ADA 264115, 1993.
- [5] Stein K R, Benney R J. Parachute inflation: a problem in aero elasticity [R]. NASA-ADA284375, 1994.
- [6] Tutt B A, Taylor A P. The use of LS-DYNA to simulate the inflation of a parachute canopy [R]. AIAA 2005-1608, 2005.
- [7] Tutt B A, Taylor A P, Jean C B, et al. The use of LS-DYNA to assess the performance of airborne system North America candidate ATPS main parachutes [R]. AIAA 2005-1609, 2005.
- [8] Kim Y S, Peskin C S. 3-D parachute simulation by the immersed boundary method[J]. Computers and Fluids, 2009,38:1080-1090.
- [9] Takizawa K, Tezduyar T E. Computational methods for parachute fluid structure interactions[J]. Arch Comput Methods Eng, 2012,19:125-169.
- [10] Takizawa K. Fluid structure interaction modeling of spacecraft parachutes for simulation-based design [J]. Journal of Applied Mechanics, 2012,79:1-9.
- [11] 贾贺,荣伟,陈国良.基于 LS-DYNA 软件的降落伞充气过程仿真研究[J].航天器环境工程,2010,27(3):367-373.  
Jia He, Rong Wei, Cheng Guoliang. The simulation of parachute inflation process based on LS-DYNA software[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010,27(3):367-373.