

文章编号: 1000-8055(2009)07-1584-10

锥形降落伞开伞过程流动结构相互作用 的数值模拟

吴 卓, 曹义华, 宋乾福

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 根据多结点开伞模型建立了锥形降落伞系统的变形动力学方程组来对充气过程中的伞衣柔性体变形过程进行模拟. 结合多结点模型动力学方程结算代码和计算流体力学软件, 对降落伞的充气过程进行流固耦合动态仿真, 从而得到充气过程中伞衣外形和流场的变化, 以及充气时间、下降速度变化和下降距离等相关数据, 与国外研究成果相吻合.

关 键 词: 降落伞; 计算流体力学; 流动结构相互作用; 数值模拟; 流场

中图分类号: V244.21+6

文献标识码: A

Numerical simulation of fluid structure interaction in conical parachute's opening process

WU Zhuo, CAO Yi hua, SONG Qian fu

(School of Aeronautical Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: According to a multi-node model, this paper has constructed dynamics equations of conical parachute system to simulate distortion process of the flexible canopy in the opening process. By combination of dynamics equations code and computational fluid dynamics (CFD) software, the fluid-structure interaction study of the parachute was carried out, and the change of its shape and flow field, inflation time, the rate of decline, the distant of decline, and other relevant data were achieved in agreement with foreign research results.

Key words: parachute; computational fluid dynamics (CFD);

fluid-structure interaction; numerical simulation; flow field

降落伞作为一种有效的减速装置, 被广泛应用于航空航天、兵器 and 体育运动等领域. 降落伞的整个下落过程一般按时间历程分为拉直、充气及稳定下降三个阶段, 而其中充气阶段是物理过程最复杂的一个阶段. 这是因为伞衣是柔性织物, 在充气过程中伞衣在短时间内经历了结构大变形. 与此同时, 伞衣内外的流场也会产生复杂的变化. 再加之两者的相互耦合, 使充气问题更为复杂. 总的说来, 降落伞充气问题是一个涉及到结

构变形和流场变化以及二者交互影响的流固耦合问题.

另一方面, 作为降落伞一种主要的伞型, 锥形伞无论在民间还是军事上都有着广泛的应用. 结构上的特点造成了锥形伞流场在很多方面和国内外研究较多的平面圆形伞之间存在着较大差别. 然而, 国内外针对锥形伞的研究却少之又少, 尤其是锥形伞的充气过程.

基于上述两点, 本文利用已有的多节点模型,

收稿日期: 2008-06-27; 修订日期: 2009-03-16

收稿日期: 国家自然科学基金(10577003)

作者简介: 吴卓(1982-), 男, 吉林松原人, 硕士生, 主要从事飞行器空气动力学的研究.

简化了锥形降落伞系统模型, 对其充气过程中进行数值模拟, 从而得到了充气过程中伞衣外形和流场的变化等相关数据, 并着重分析了锥形伞开伞过程中流场中旋涡发展变化的过程.

1 简化的锥形降落伞模型

降落伞的流场非常复杂, 其流动是非定常的, 流固交界面是动态的, 伞衣织物还具有透气性. 这些因素大大的增加了数值模拟的困难. 在建立锥形降落伞模型的时候, 拟做出了以下假设来对其进行适当的简化.

1.1 流固耦合的准定常假设

在钝物体绕流的实验中, 无开孔的凹半球壳的绕流中会随机的产生横向涡, 使流场变得很不对称. 同时球壳边缘会产生周期性或非周期性的脱落涡, 对半球壳本身造成很大的侧向力和摆动. 文献[1-2]的实验对比中可以看出, 对于开孔球壳, 适当的开孔和足够的开孔度可以降低这种横向涡的尺度甚至避免这种不对称涡的产生. 降落伞的顶孔可以明显增加降落伞的稳定性, 大大减弱流场的非定常效应^[3]. 因此在进行流固耦合时, 近似的认为降落伞的流场是一个准定常的流动现象, 即耦合的每一步计算时, 都看作是定常流场进行计算.

1.2 流场简化假设

一般降落伞的开伞过程中下降速度在 50m/s 以下, 因此降落伞流场是典型的不可压流动问题. 降落伞系统是典型的自平衡系统, 实际的降落伞在下降过程中, 是在变化的小迎角范围内缓慢的摆动, 本文假设降落伞下降过程中来流攻角保持不变.

1.3 降落伞结构的简化假设

在本文的降落伞流场计算中, 没有考虑伞衣织物的透气性问题. 本文还将伞面简化成一个轴对称旋转体(忽略伞衣幅和加强带以及所有伞衣上的开口和褶皱, 参见图 1~ 图 3), 结构和流场都可以在二维情形中进行讨论和计算. 织物和伞衣的弯曲刚度都为零, 并且忽略伞绳的质量和变形. 在整个开伞过程的模拟过程中, 伞衣上任一点的压力数值在圆周方向的分量保持不变.

简化后的锥形降落伞模型的各项剪裁尺寸、未充气时的模型物理外观图和充满空气时侧面图由图 1~ 图 4 给出.

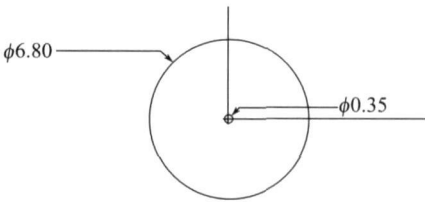


图 1 简化后的锥形伞模型伞衣尺寸(单位:m)(上视图)
Fig. 1 Size of the conical parachute simplified model (unit: m) (top view)

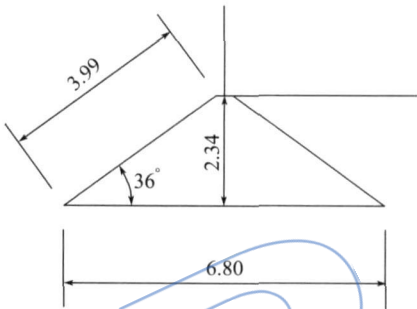


图 2 简化后的锥形伞模型伞衣尺寸(单位:m)(前视图)
Fig. 2 Size of the conical parachute simplified model (unit: m) (front view)

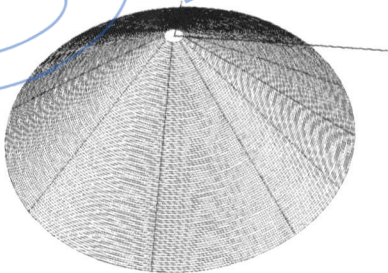


图 3 简化后的锥形伞模型未充气时的物理外观图
Fig. 3 Physical appearance of no-inflatable model

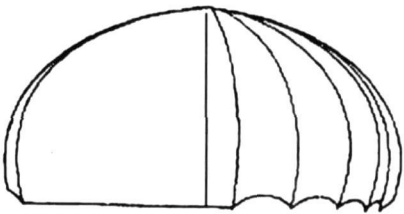


图 4 锥形降落伞充满时的侧面图^[4]
Fig. 4 Side elevation of inflatable model^[4]

本文用到的锥形伞物理参数为: 伞衣半径 $R=3.4\text{ m}$, 顶孔半径 $r=0.175\text{ m}$, 伞绳自由段长度 $l=6.4\text{ m}$, 伞衣质量 $m_p=10\text{ kg}$, 回收物质量 $m=90\text{ kg}$, 伞衣编织物的弹性模量 $E_b=2976\text{ N/m}$, 减缩系数 $K=0.47^{[5]}$. 降落伞开伞过程中气流无攻角, 初始下降速度 $V_0=50\text{ m/s}$, 重力加速度 $g=$

9.8 m/s^2 , 空气密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$.

2 伞衣的多节点结构模型

伞衣结构模型在本文研究中用来求解伞衣在外力作用下的应力和位移问题, 从而得到开伞过程中某一时刻的伞衣外形. 对于降落伞开伞过程中的每一时刻, 都可以应用达朗贝尔原理在伞衣上增加虚拟的惯性力, 从而使动力学问题转化而静力平衡问题求解. 因此, 只要能建立一个方便计算且保持降落伞力学特性的结构模型, 就可以按后文提到的流固耦合基本流程进行迭代, 得到开伞过程中某一时刻的流场结构.

2.1 伞衣多节点模型的建立

由于简化后的伞衣结构是轴对称的, 假设充气过程中始终保持对称充气, 则可认为模型结构和流场近似的保持轴对称. 因此降落伞的外形就可以只用其伞衣表面任一条经线的形状来表示. 用 $N-1$ 个同心圆环将伞衣面分割为 N 个圆环带. 在经线与同心圆的交点处放上质量节点, 并将每个圆环带的质量集中到其上较靠近中心的那个节点上去. 对于每个节点, 受到的合力方向总是在中轴线和该经线所在的平面上. 因此, 只用考虑其在竖直方向 Y 上和圆周法向 X 上的位移. 这样就将三维轴对称问题转化为二维问题, 并且保证了伞衣在模拟过程中的动力学特征和运动学特征都能通过此多节点系统近似的表现出来^[6]. 图 5 给出了多节点结构模型建立的示意图.

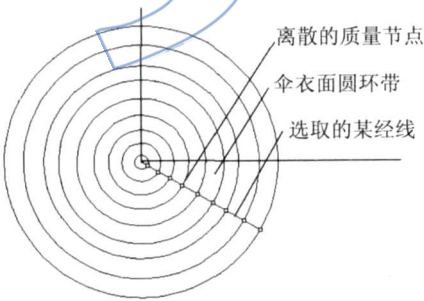


图 5 伞衣多节点模型的建立

Fig. 5 Founding multi node model of canopy

建立好伞衣的多节点结构模型后, 降落伞结构转化为二维问题. 加上伞绳上的载荷, 整个降落伞系统在 Y 方向上的受力情况如图 6 所示.

图 6 中 T 为伞绳上的拉力, D 为气动阻力, $m(i)$ 为第 i 个节点所代表的质量. 将整个伞衣简化为多节点结构模型后, 各个质量结点之间由零度经线所代表的伞衣弧线段联结, 再引入代表回

收物质量的质点 M , 通过伞绳将伞衣质点系和回收物质点联系起来就形成了代表整个降落伞系统的多结点模型.

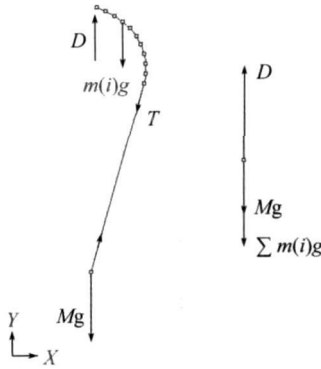


图 6 降落伞在 Y 方向上的受力情况

Fig. 6 Multi node model of parachute system

2.2 多结点模型动力学方程组的建立

为确立多结点模型的动力学方程组, 将结点分为边界结点和非边界结点两类. 下面分别对两者的受力情况做出分析.

2.2.1 非边界质量结点的受力情况

以位于非边界位置的质量结点 i 为例来说明非边界质量结点的受力情况. 联结 i 的前后弧段分别为 k 和 $k+1$, 其受力情况参见图 7. 图中, $\alpha(k)$ 是第 k 条弧线段外法线方向和 X 轴夹角, $a_x(i)$, $a_y(i)$ 分别是结点 i 在 X 方向和 Y 方向的加速度.

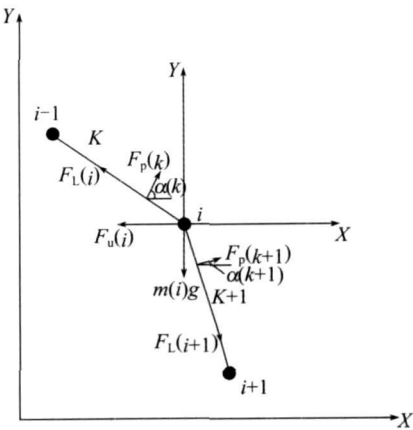


图 7 伞衣质量结点 i 受力图

Fig. 7 Forces on node i

重力

$m(i)g$, $m(i)$ 是第 i 个质量结点的质量, g 是重力加速度. 质量使结点产生沿 Y 方向的重力.

弹性力

$$F_L = 2\pi\alpha_m X = \frac{E_b(\varepsilon_m + K\varepsilon_u)}{1 - K^2}2\pi X \quad (1)$$

$\varepsilon_m, \varepsilon_u$ 分别是经线方向和纬线方向的应变^[5], K 是减缩系数. 各个质量结点通过伞衣微段联结在一起, 在 X - Y 坐标系内运动产生空间位置变化从而导致结点间距发生变化, 由于伞衣是由弹性模量一致的编织物构成的, 所以间距的变化必然引起结点间力的变化, 产生沿着结点联结方向的弹性力 F_L , 每个质量结点受到前后两个质量结点相对运动产生的弹性力 $F_L(i), F_L(i+1)$.

圆周力

$$F_u = \alpha_u L = \frac{E_b(\varepsilon_u + K\varepsilon_m)}{1 - K^2}L \quad (2)$$

L 是伞衣微段经线方向的弧长^[5]. 开伞时伞衣在 X 方向向外扩张, 在伞衣纬线上会产生弹性变形, 这种变形不与质量结点间距变化相联系, 而是与结点所在的伞衣纬线段的变形有关, 也就是与结点距离伞衣轴线的距离有关.

气动力

$$F_p = dpS \quad (3)$$

dp 是伞衣内外压差, S 是伞衣微段的面积. 由于伞衣内外气体流动情况不一致产生压力差, 作用在伞衣表面上之后就形成了气动力. 本文中, 考虑质量结点间使用直线代表弧段, 各个结点所受的气动力由上下两相邻伞衣弧段各一半的气动力作矢量和获得.

在上述各种力的作用下, 列出非边界质量结点 i 在 X, Y 方向的动力学方程.

X 方向

$$F_L(i+1)\sin[\alpha(k+1)] - F_L(i)\sin[\alpha(k)] - F_u(i) + F_p(k+1)\cos[\alpha(k+1)] + F_p(k)\cos[\alpha(k)] = m(i)a_x(i) \quad (4)$$

Y 方向

$$-F_L(i+1)\cos[\alpha(k+1)] + F_L(i)\cos[\alpha(k)] - m(i)g + F_p(k+1)\sin[\alpha(k+1)] + F_p(k)\sin[\alpha(k)] = m(i)a_y(i) \quad (5)$$

根据已知条件给出第 i 个结点在时刻 $t = 0$ 的速度, 假设结点在时间段 Δt 之内匀变速运动, 由结点受力情况和上述方程得出其加速度值, 运用匀变速运动的运动学方程就可以求得在 Δt 时间后的结点位移和速度. 不断地进行时间推进就可以获得结点 i 任意时刻的坐标和速度值. 当然, 结点的受力随着时间推进是不断变化的, 因为流场情况不断衍变导致气动力 F_p 随时间改变, 同

时各个结点位置也不断变化引起弹性力 F_L 和 F_u 随时间改变.

以上是位于伞衣中间位置的质量结点 i 的受力情况. 伞衣多结点模型的起点(顶孔处), 即第 1 号结点, 和终止点(伞衣底边处), 即第 N 号结点, 的受力情况与此有所差异. 伞衣顶孔处的第 1 个结点没有前部结点相对运动引起的弹性力; 第 N 个结点没有后部结点相对运动引起的弹性力, 但与回收物之间通过伞绳拉力产生相互作用. 下面对伞衣多结点模型边界结点的受力情况进行分析.

2 2 2 起始质量结点的受力情况

在起始质量结点处, 只考虑圆周力 $F_u(0)$, 重力 $m(0)g$, 与后一个结点之间的弹性拉力 $F_L(0)$ 以及下半段伞衣在气动压差作用下的气动力 $F_p(0)$ (如图 8). 从而得到伞衣起始质量结点的动力学方程.

X 方向

$$F_L(0)\sin[\alpha(0)] - F_u(0) + F_p(0)\cos[\alpha(0)] = m(0)a_x(0) \quad (6)$$

Y 方向

$$-F_L(0)\cos[\alpha(0)] - m(0)g + F_p(0)\sin[\alpha(0)] = m(0)a_y(0) \quad (7)$$

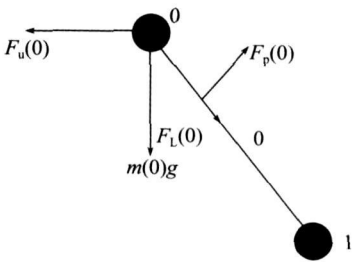


图 8 伞衣模型起始质量结点受力图
Fig. 8 Forces on initiative node

2 2 3 终止质量结点的受力情况

在终止质量结点处, 考虑圆周力 $F_u(N)$, 重力 $m(N)g$, 与前一个结点之间的弹性拉力 $F_L(N)$, 上半段伞衣在气动压差作用下的气动力 $F_p(N)$ 以及伞绳的拉力 T (如图 9). 从而得到伞衣终止质量结点的动力学方程.

X 方向

$$-F_L(N)\sin[\alpha(N)] - F_u(N) + F_p(N)\cos[\alpha(N)] - T\sin\theta = m(N)a_x(N) \quad (8)$$

Y 方向

$$F_L(N) \cos[\alpha(N)] - m(N)g + F_p(N) \sin[\alpha(N)] - T \cos \theta = m(N)a_y(N) \quad (9)$$

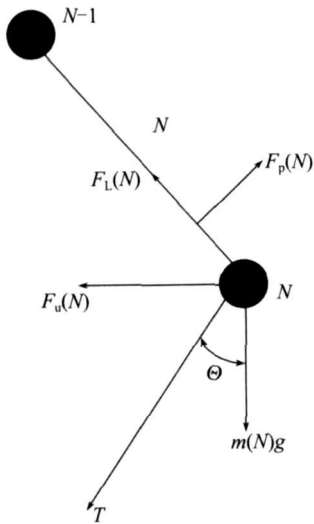


图 9 伞衣模型终止质量结点受力图
Fig. 9 Forces on last node

2 2 4 回收物质质量结点受力情况

回收物质质量结点的受力情况与伞衣质量结点的受力情况有所不同,对于它不需要考虑伞衣上的气动力问题,其受力情况如图 10 所示。

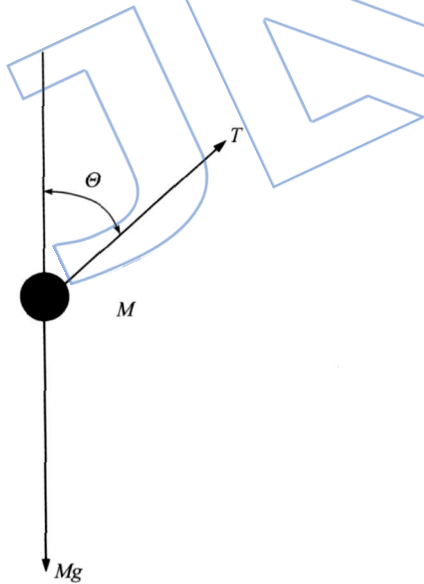


图 10 回收物质质量结点受力图
Fig. 10 Forces on recycling materials node

从而得到回收物质质量结点的动力学方程。

X 方向

$$T \sin \theta = Ma_x \quad (10)$$

Y 方向

$$T \cos \theta - Mg = Ma_y \quad (11)$$

2 2 5 降落伞整体系统的动力学方程

整个降落伞系统由伞衣、伞绳和回收物组成,不考虑伞绳的质量和变形.忽略回收物的气动力,开伞过程中伞衣产生的气动阻力 D 就是整个系统的阻力.因为不考虑伞绳的弹性,回收物和伞衣加速度一致.参考图 6 的系统受力图可以得出系统运动方程(只有 Y 向运动)。

Y 方向

$$D - Mg - \sum [m(i)g] = [M + \sum m(i)] a_{sy} \quad (12)$$

方程 (12) 中 a_{sy} 是系统在 Y 方向的加速度, $\sum m(i)$ 等于伞衣质量 m_p 。

已知 $t = 0$ 时刻的下降速度 V_0 ,假设系统在时间段 Δt 之内匀变速运动,由上述方程得出系统加速度值,运用匀变速运动的运动学方程就可以求得在 Δt 时间后的系统位移和速度,不断地进行时间推进就可以获得系统在任意时刻的 Y 方向位移和速度值。

综合上述方程就得到了降落伞系统多结点结构模型的力学方程组.对降落伞充气过程的结构变形仿真转化为求解这个方程组以获得各个结点在任意时刻的位置、速度和加速度等相关数值。

3 流场计算和流固耦合

在结构变形上,本文利用自主编制的多结点模型程序来求解柔性体变形,而在流场计算中,本文采用 CFD 方法研究开伞过程中的流场变化,解算器是商用软件 Fluent. 在选取湍流模型时,考虑到可能产生回流,故采用了 RNG $k-\epsilon$ 模型.根据研究问题的特点,在解算流场过程中采用了国际上常用的耦合求解低速的压力、速度场问题的 SIMPLE 算法^[7].伞衣采用固壁边界条件,近壁面黏性层的处理采用标准的壁面函数.在伞衣中心沿对称轴方向上使用对称边界条件减少计算网格数;在远离伞衣的地方采用速度入口边界条件(如图 11)^[8].在每一步迭代中,根据伞衣当时的形状特点,计算网格重新由人工生成.整个开伞过程雷诺数从初始时刻的 2.3×10^7 随速度变化降到结束时刻的 5×10^6 ,其具体变化情况可参考后文中的速度变化曲线。

首先根据初始伞衣形状,利用 CFD 方法计算出伞衣上压力分布,再代入多结点模型程序中计算出新的伞衣形状,又把新的伞衣形状重新代

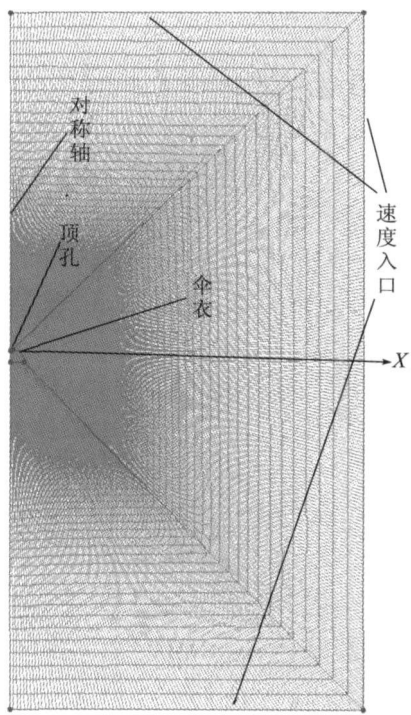


图 11 稳定阶段流场计算域与边界条件

Fig. 11 Computational area and boundary conditions of fluid field in steady stage

入 CFD 程序中以获得新的压力分布数据. 如此反复循环, 直至达到稳定要求, 输出计算结果.

流固耦合过程如图 12 所示.

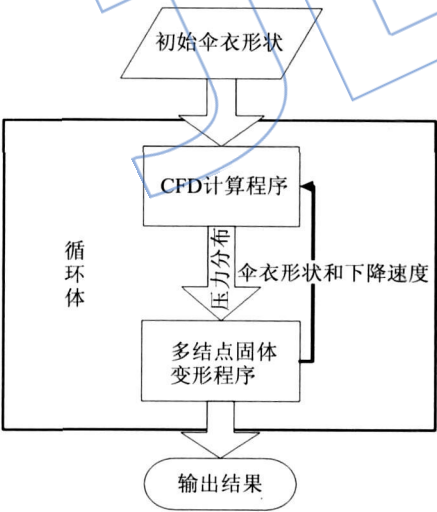


图 12 流固耦合计算流程

Fig. 12 Procedure of fluid structure interaction

可以看到, 本研究中采用的是松散的流固耦合计算方法, 即并不将流场计算方程和固体计算方程合并起来进行统一求解, 而是分别进行计算, 在固体计算模块中取得流场计算模块中所需要的数据, 然后再进入流场计算模块中进行计算, 获得

固体计算模块中所需要的数据, 如此反复进行直至达到稳定或者收敛条件.

之所以采用松散的流固耦合计算方法, 一方面是考虑到计算资源和研究者知识能力的限制; 同时也考虑到了对于降落伞充气过程的流场变化采用了准定常假设.

由于初始计算时刻, 降落伞已经由诱导伞拉直成直线型. 本文将降落伞得初始模型选为与 Y 轴负方向成 β 外倾斜角的线段. 而以往得研究多假定初始伞衣为已经张开的, 但本文中不存在这一假设, 更符合实际情况.

4 计算结果分析

锥形降落伞多结点模型在经历了 1.25 s 后, 加速度降为 -0.645 m/s^2 , 速度降为 -11.504 m/s . 加速度值降为很小, 并且相对稳定不变, 可视为开伞过程结束, 因而停止计算.

4.1 伞衣外形变化

图 13 列出了最有代表性的伞衣形状变化图形, 并做出相应的分析.

由于气动力变化剧烈, 使得伞衣在开伞动载作用下变形剧烈, 由此也产生了较大的内应力, 大的内应力起着恢复力的作用, 会限制伞衣的变形, 促使伞衣恢复原尺寸, 而动载在剧烈增加之后会迅速下降, 无法维持伞衣的大变形, 所以伞衣内应力可以使之恢复一些形状, 由此产生了所观察到的“呼吸现象”^[9]. 也就是说, 伞衣在开伞过程中并不是单纯的向外扩张, 还存在扩张—收缩—再扩张的振荡现象, 如在图 13(a) 中可以看到伞衣在 0.07 s 时的外形相对于 0.06 s 时上部伞衣收缩. 在图 13(d) 中, 0.31 s 到 0.33 s 以及 0.33 s 到 0.35 s 也出现了“呼吸现象”.

开伞过程的 0 s 到 0.35 s 这段时间内伞衣的形状变化较大, 尤其是 0 s 到 0.07 s 伞衣形状变化非常剧烈. 在 0.35 s 之前, 伞衣形状变化和下降速度变化的双重作用使得该伞的特性变化迅速. 而当该伞在开伞过程进行到 0.37 s 时形状基本稳定, 变化较小, 相应的对于该伞的影响也较小, 伞的特性变化主要由下降速度变化引起, 总的变化较小. 可以看出开伞过程可以依据伞衣的形状变化程度分为剧烈变化的前半阶段和温和变化的后半阶段. 充气阶段结束后, 本文得出的伞衣稳定形状(图 13(f)) 和文献[4] 中给出得锥形伞充满时侧视图基本吻合, 从而证明了多结点模型运用在锥形伞开伞过程中相关计算的可行性.

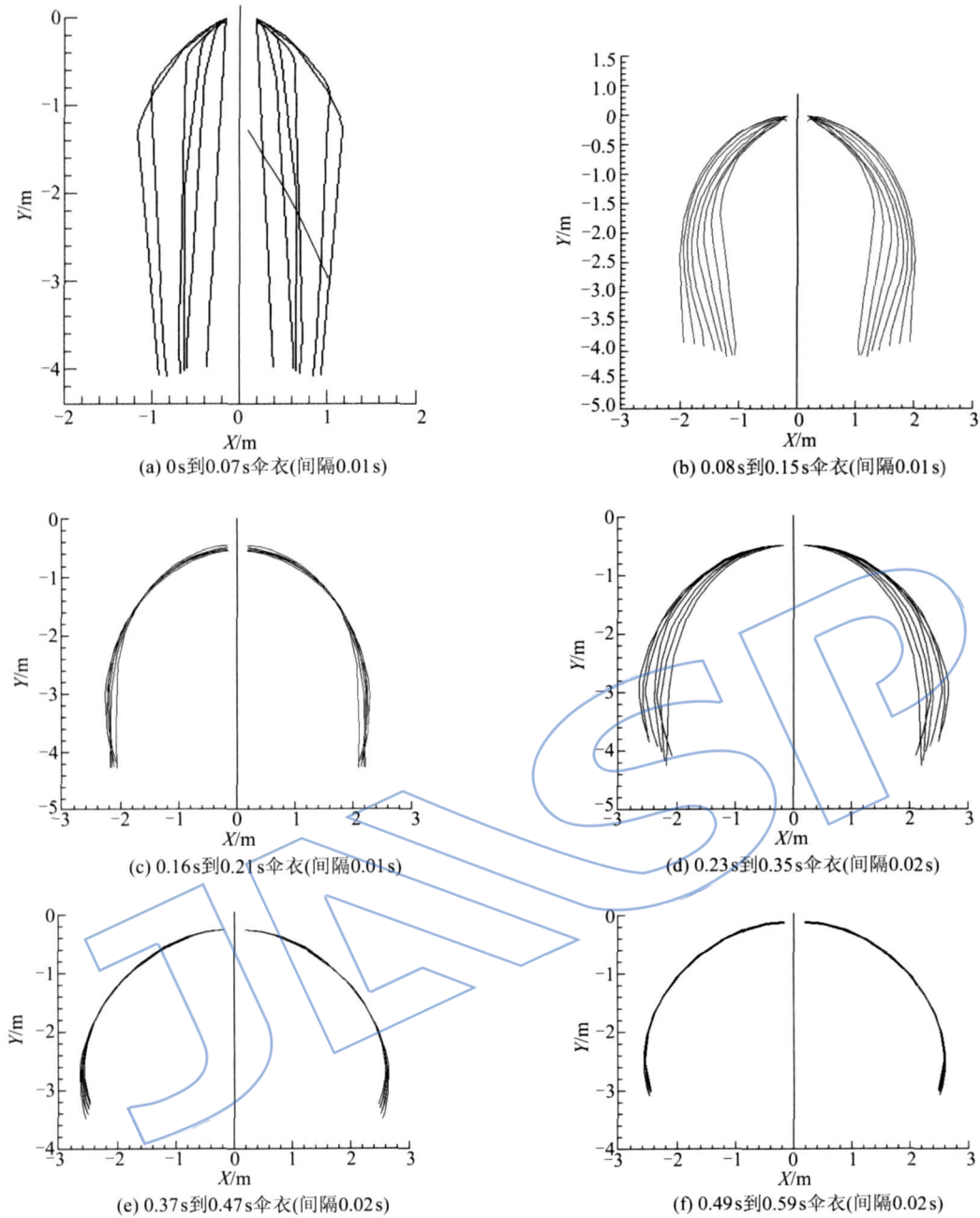


图 13 部分时间节点处伞衣形状图

Fig. 13 Change of canopy shape (portion)

4 2 流场变化

降落伞在开伞过程中, 流场的流动特性变化非常迅速. 在 1. 25 s 内, 降落伞由 50 m/ s 的初速度迅速下降到 12 m/ s 以下, 伞衣的形状也经历了变化最快的过程. 对这一过程的深入研究需要大量的计算和长时间的数据采集. 这里选取了锥形降落伞开伞过程中几个具有代表性的结构外形, 给出了相应的流场模拟结果, 并作了流场结构变化的分析, 初步了解了锥形伞开伞过程中的流场变化特点. 图 14(a) ~ (e) 给出了锥形伞开伞过程中流场变化的情况.

从图 14 可以看到降落伞绕流流场结构的形成过程. 在开伞的最初状态时, 整幅伞衣呈无上下低面的圆台状. 简化到 2- D 截面后即伞衣经线为一条直线. 初始设定与中轴线夹角为 3°. 在最初的流场模拟中, 气流并没有出现分离. 但是由于来流的速度很大以及伞衣顶孔小, 伞衣上的气动力使得顶孔边缘在逆压下迅速充气, 气流开始从伞衣顶孔附近表面和未张开的底部表面分别卷起两个主涡 V1 和 V2(图 14(a)). 这一时刻伞衣大部分外形保持和初始时一样, 只有顶孔边缘处向外

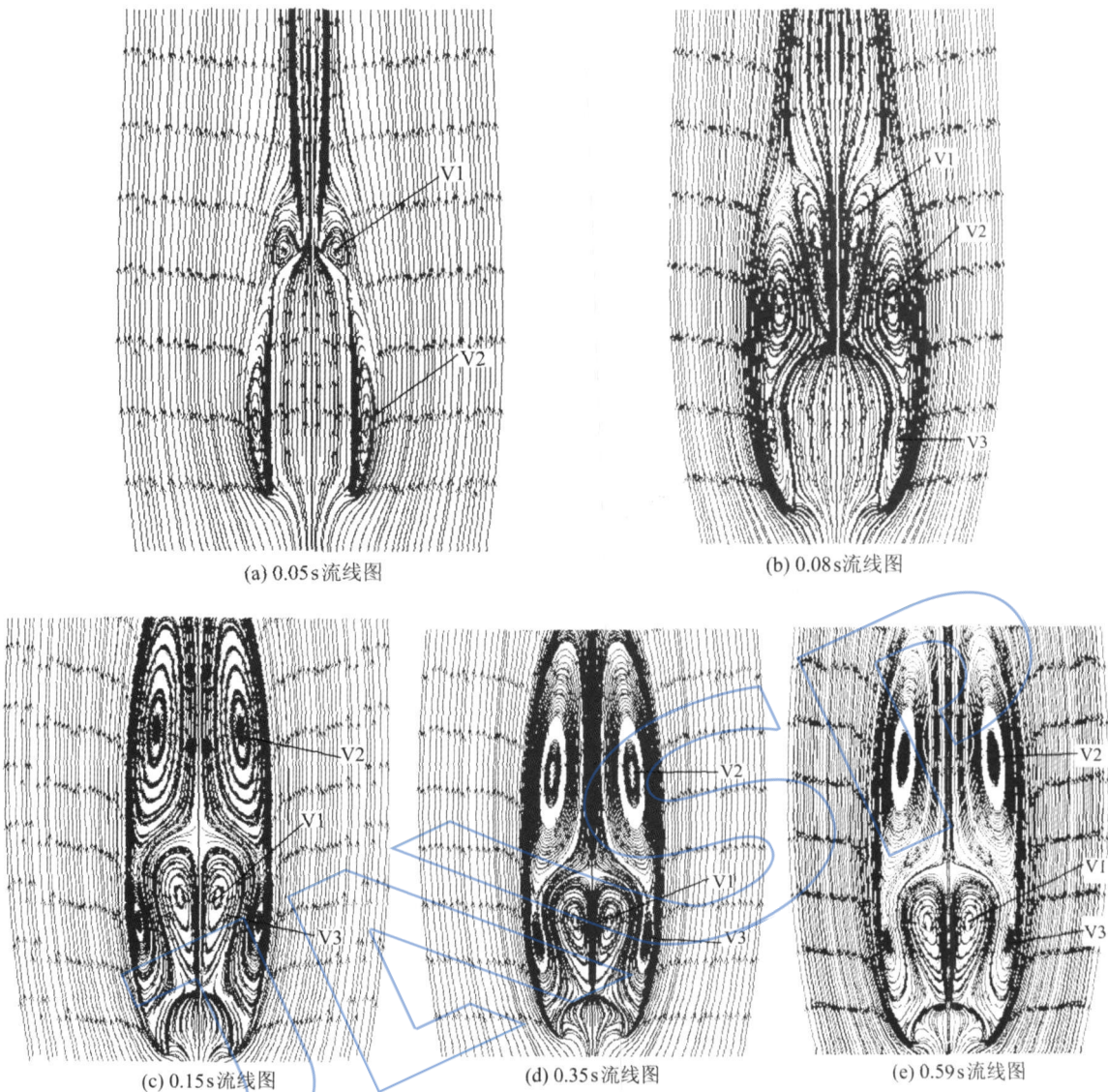


图 14 锥形伞开伞过程中流场变化图

Fig. 14 Change of fluid field in opening process of the conical parachute

稍稍打开。顶孔附近分离产生的主涡 V1 具有和伞衣下缘分离生成主涡 V2 相反方向的涡量, 因此迅速吸引伞衣下缘的主涡向上运动。随着充气的进一步进行, 顶孔处分离产生的涡 V1 逐渐成长变大, 这种吸引作用也更加明显。因此在图 14 (b) 中, 可以看到伞衣下缘分离产生的主涡 V2 已经逐渐脱离伞面, 向气流下游移动。同时, 这种涡之间的相互作用也会影响流场中的压强分布, 从而对伞衣的结构造成影响。伞衣下缘大涡 V2 的被吸引而脱离伞面, 使得伞衣下缘外侧形成一个低压区, 从而使得伞衣下端微微翘起。因此气流在此分离产生一个新主涡 V3(图 14(b))^[10]。需要说明的是, 图 14 中 (a) 和 (b) 图的比例尺与图 14 (c), (d) 和 (e) 图的不一样, 此时的涡的尺度相对较小, 可看作刚刚开始形成涡的阶段。

随着伞衣的张开, 涡 V2 继续被抬高, 但涡 V1 由于与伞衣接触面小并且被顶孔出流和外流限制, 没有 V2 移动的快, 被 V2 超过(图 14(c))。与此同时, 涡 V3 也向上移并取代了 V2 的位置。图 14(c) 的时刻是伞衣在气动力的作用下第一次张开时。此时顶孔和伞衣边缘的两个主涡 V1 和 V3 都已经基本成型, 由于顶孔周围的伞衣已经充气, 顶孔处也发生了气流分离。而且此时的来流速度虽然比初始时要慢很多, 但是仍然比稳定下降阶段快得多, 所以此时孔流的分离也产生了很大逆压。由图中可以看到顶孔分离产生的涡 V1 将伞衣边缘产生的涡 V3 挤在外侧。此时来流速度进一步降低, 伞衣边缘分离产生的主涡 V2 得到充分发展, 渐渐将顶孔分离产生的主涡 V1 压住。

图 14(d) 中, 伞衣由于开伞初期剧烈的气动力变化而产生了很大的形变, 因此内应力很大, 而同时动载无法维持在较高的峰值, 因此伞衣在较大内应力的回复作用下反而收缩, 即发生“呼吸现象”, 伞衣会重复充气张满和回缩的过程数次。

图 14(e) 是锥形伞即将稳定时的流场, 其涡结构与图 14 中的 (c) 和 (d) 十分相似. 整个流场结构已经基本稳定.

4 3 下降特征变化

锥形降落伞多结点模型在经历了 1.25 s 后, 加速度降为 -0.645 m/s^2 , 速度降为 -11.504 m/s , 总的下降距离为 27.354 m. 在 0.16 s 和 0.21 s 的时间点开伞气动载荷达到峰值(图 15). 在文献 [11] 中给出过一个典型的开伞力曲线图, 明确指出了开伞过程中存在两个动载极值点, 分别对应伞绳拉直时产生拉伸力和伞衣迅速充气变形产生充气力极值. 本文中得开伞力曲线变化情况与文献 [11] 中的情况定性上是吻合的. 但由于伞形不同, 还是存在着差异. 速度值随开伞时间增加剧烈

的下降. 如图 16 虚线所示. 图 16 中实线曲线是文献 [12] 通过工程算法得出的速度随时间变化的曲线. 我们可以看到两条曲线形状相似, 但没有完全吻合. 这是因为本文和文献 [12] 虽然都用的是锥形伞, 但两个伞的半径、锥角和伞衣幅数都不相同, 所以并没有完全吻合.

5 结 论

对开伞过程中锥形伞绕流流场的初步分析显示出流场的发展有以下几个特点:

- 1) 气流分离首先在伞衣边缘处发生, 并且分离产生的涡附在伞衣表面, 在开伞完成之前不会脱落, 其中顶孔附近产生的涡一直不会脱落.
- 2) 开伞过程中, 伞衣第一次完全张开后, 顶孔处分离产生的涡发展趋势是逐渐变弱, 而伞衣下缘分离产生的涡发展趋势是逐渐变强, 最终压住顶孔处的涡. 而伞衣下缘产生的新涡反被顶孔处的涡压制, 挤向外流.
- 3) 开伞过程接近尾声时, 伞衣下缘在初始阶段产生的主涡已经完全与伞衣分离, 各个主涡的位置基本不变, 形成稳定下降时流场中的锥形.

参考文献:

[1] Suryanarayana G K, Prabhu A. Effect of natural ventilation on the boundary separation and nearwake vortex shedding characteristics of a sphere [J]. Experiments in Fluids, 2000, 29(6): 582-591.

[2] Kalro V, Tezduyar T E. 3D computation of unsteady flow past a sphere with a parallel finite element method [J]. Oceanographic Literature Review, 1998, 115(1-2): 267-276.

[3] 连淇祥, 周民选. 凹半球降落伞模型在加速和定常流中的流场观测 [J]. 航空学报, 1988, 9(1): 84-90

LIAN Qixiang, ZHOU Minxuan. Experimental investigation on rigid hollow hemispherical parachute model in accelerating and steady flow [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(1): 84-90. (in Chinese)

[4] Ewing E G, Bixby H W, Knacke T W. Recovery system design guide [M]. California: Irvin Industries Inc., 1978.

[5] 朱吕蟾译. 平面圆形伞充满时的力、应力和形状的近似计算 [J]. 空降技术, 1983, (1): 143-177.

ZHU Lüchan(trans.). An approximate approach to calculate drag, stress and deformation of inflated flat circular parachute [J]. Landing Technology, 1983, (1): 143-177. (in Chinese)

[6] 潘星, 曹义华. 降落伞开伞过程的多结点模型仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34 (2): 188-192

PAN Xin, CAO Yihua. Simulation of parachute's opening process with multi-node model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(2):

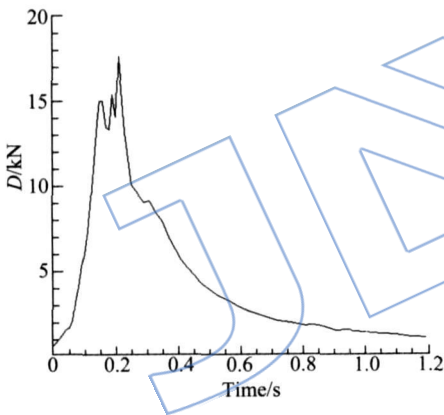


图 15 开伞气动阻力数值随时间变化曲线
Fig. 15 Change of inflation force

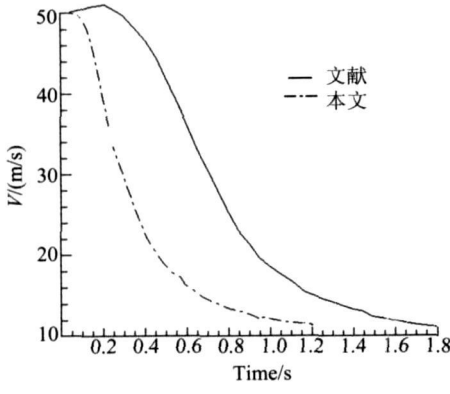


图 16 下降速度值随时间变化曲线
Fig. 16 Change of descent velocity

188-192. (in Chinese)

[7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001

[8] 张涵信, 沈孟育. 计算流体力学: 差分方法的原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003

[9] 余莉, 明晓, 胡斌. 降落伞开伞过程的试验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(2): 176-180

YU Li, MING Xiao, HU Bin. Experiment investigation in parachute opening process [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(2): 176-180 (in Chinese)

[10] 童秉纲, 张炳暄, 崔尔杰. 非定常流与涡运动 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997

[11] Watkins J W. A total energy method to predict parachute canopy inflation forces [R]. AIAA 2003-2166, 2003

[12] Mohaghegh F, Jahannama M R. Parachute filling time: a criterion to classify parachute types [R]. AIAA 2007-2527

