降落伞开伞过程的多结点模型仿真

潘 星 曹义华

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 根据降落伞的结构和力学特征,在轴对称假设下创建了伞衣及回收物系统的多结点结构模型. 通过考虑应力,重力和气动力的作用效果,建立了用于无气流攻角平面圆形降落伞充气模拟的多结点结构模型动力学方程组. 对开伞过程中的流场变化引入准定常假设,利用 simple算法数值模拟求解 RNG(Renormalization Group) k-ε湍流模型下的雷诺平均N-S (Navier-Stokes)方程以获得选定时刻的伞衣表面压力分布. 结合多结点模型动力学方程组的解算代码和计算流体力学程序,采用流固耦合的方法对选定的平面圆形降落伞模型的开伞过程进行了动态仿真,得到了开伞过程中降落伞外形和特性的变化. 通过结果分析和比较,证明了多结点模型的可行性,发展出了一种用于降落伞流固耦合计算的新方法.

关 键 词: 降落伞; 可充气装置; 计算流体动力学; 流固耦合; 仿真

中图分类号: V 244.21^{+}6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)02-0188-05

Simulation of parachute's opening process with multi-node model

Pan Xing Cao Yihua

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Multi-node model of canopy and parachute system under axisymmetrical hypothesis was set up according to their structural and mechanics characteristics. Dynamics equations of this model for simulating inflation process of flat circular parachute with no angle of attack have been constructed by considering the effect of stress, gravity and pressure. On the assumption that the evolvement of fluid field is quasi-steady, the pressure values on the canopy at selected moments were calculated out by solving RANS(Reynolds averaged navier-stokes) equations of RNG(renormalization group) k-ε turbulence model with simple algorithm. With the combination of dynamics equations code and CFD(computational fluid dynamics) program, the fluid-structure interaction study of a selected parachute was carried out, and the change of its shape and characteristics was simulated. The feasibility of multi-node model is confirmed by analyzing calculated results and comparing them with those from some other researches. A new method to study the fluid-structure interaction of parachute is established.

Key words: parachutes; inflatable equipment; computational fluid dynamics(CFD); fluid-structure interaction; simulation

降落伞开伞过程的研究始终是一个难点,整个过程涉及到结构变形和流场变化以及二者的交互影响,是一个复杂的流固耦合问题.

当前对开伞过程的研究大体分为3类:完全试验法、半试验半理论方法和完全理论方法. 完全试验法是从多次试验所得的数据中寻找充气过程的规律. 半试验半理论方法通过建立充气模型研究充气,但模型中的某些重要参数由试验得到. 完全理论方法则建立不依赖试验的模型研究充气过程.

收稿日期: 2007-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10577003)

作者简介: 潘 星(1982-),男,四川通江人,硕士生, velocity-px@163.com.

本文利用降落伞结构特性建立了一套多结点模型模拟降落伞开伞过程中的外形变化,对流场变化引入准定场假设,用计算流体力学方法求解开伞过程中的外流场特性,采用流固耦合方法对选定的平面圆形降落伞的开伞过程进行仿真,得到了开伞过程中外形和动力学特性的变化,计算出了开伞的时间和下降距离等相关参数.

1　多结点结构模型的建立

1.1　使用的降落伞模型及其力学假设

本研究选定的降落伞是有顶孔的平面圆形降落伞,伞衣半径 $R = 4.267\ 2$ m,顶孔半径 $r = 0.426\ 72$ m,伞绳自由段长度 $l_f = 8.534\ 4$ m,伞衣质量 $m_p = 10$ kg,回收物质量 $M = 80$ kg,伞衣编织物的弹性模量 $E_p = 2\ 976$ N/m,减缩系数 $K = 0.47$.降落伞开伞过程中不存在气流迎角,初始下降速度 $V_o = 50$ m/s,重力加速度 $g = 9.8$ m/s^2,空气密度 $\rho = 1.225$ kg/m^3.

对降落伞模型作如下假设:

1)织物和伞绳均具有零弯曲刚度,忽略伞绳的质量和变形;

2)整个伞衣是由弹性模量一定的织物构成的整体,没有加强带,仅存在一个整体性的伞衣幅;

3)开伞过程中任意时刻,伞衣上的压力数值仅沿子午线方向发生变化,沿圆周方向不变.

1.2　轴对称假设的伞衣多结点结构模型

为简化计算,假设选定的平面圆形降落伞在开伞过程中始终保持结构上的轴对称特性,伞衣的形状变化可以由它的外弧线形状变化来表征.在开伞过程中实际上只需要考虑沿着竖直方向(y)和径向(x)的运动,伞衣的力学特性也就只需要在这 2个方向进行分析,如图 1所示.

把平展时的降落伞沿半径方向均分为 N 个同心的圆带微段,每一段的质量集中到该微段的中线和 0°子午线交点,形成了具有 N 个质量结点的伞衣多结点模型(图 2),每个质量结点只考虑 x和 y方向的动力学问题,各质量结点之间由 0°子午线所代表的伞衣弧线段联结.

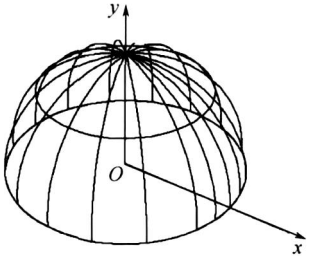
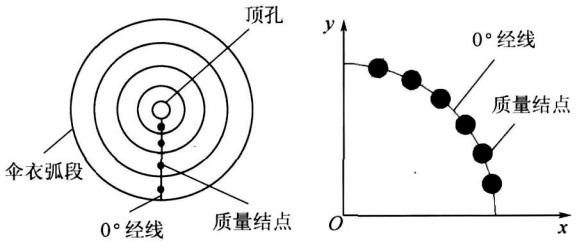


图 1　轴对称伞衣运动方向

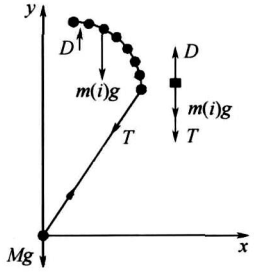


a　平展状态俯视图　　b　开伞过程侧视图

图 2　伞衣多结点模型

1.3　降落伞系统多结点模型

将伞衣简化为多结点结构模型后,再引入代表回收物质量的质点,通过伞绳将伞衣质点系和回收物质点联系起来就形成代表整个降落伞系统的多结点模型,如图 3所示.



T—拉力;D—气阻力;$m(i)$—为第 i个结点所代表的质量.

图 3　降落伞系统多结点模型

2　动态开伞模型

2.1　伞衣多结点模型动力学方程组

分析伞衣多结点结构模型的动力学特性,以质量结点 i为例来说明.联结 i的前后弧段分别为 k和 $k+1$,其受力情况参见图 4.

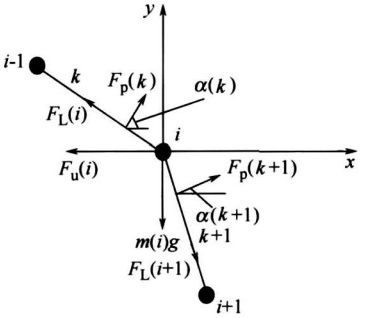


图 4　伞衣质量结点 i的受力情况

质量使结点产生沿 - y方向的重力;结点运动使间距发生变化,节点间编织物产生应变,产生弹性力[1] F_L,每个质量结点受到前后 2个质量结点相对运动产生的弹性力 $F_L(i)$和 $F_L(i+1)$;圆周力[1] F_u与结点到 y轴距离相关,对任意一个伞衣微段,圆周力的合作用力是指向 y轴的,所以结

点所受的圆周力也是指向 y轴的;气动力[1] $F_p = \mathrm{d}pS$, $\mathrm{d}p$是伞衣内外压差, S是伞衣微段的面积.

在这 4种力的作用下质量结点 i的动力学方程:

x方向:

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

y方向:

$$-F_L(i+1)\cos[\alpha(k+1)] + F_L(i)\cos[\alpha(k)] - m(i)g + F_p(k+1)\sin[\alpha(k+1)] + F_p(k)\sin[\alpha(k)] = m(i)a_y(i) \quad (2)$$

式中, $\alpha(k)$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和 y方向的加速度.

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 F_p随时间改变,同时各个结点位置也不断变化引起 F_L和 F_u随时间改变.

模型中的边界结点,即第 1个和第 N个结点,其受力状况与中间的各个结点有区别. 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;而第 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.

组合各质量结点的动力学方程构成伞衣的动力学方程组,一起求解就得到了伞衣模型的运动情况.

2.2 系统动力学方程的建立

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 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 3的系统受力图可以得出系统运动方程 (只有 y向运动):

$$D - Mg - \sum[m(i)g] = \left[M + \sum m(i)\right] a_{sy} \quad (3)$$

式中, a_{sy}是系统在 y方向的加速度; $\sum m(i) = m_p$.

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,由式 (3)得出 a_{sy}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向位移和速度值.

3 流场计算与流固耦合

虽然降落伞开伞过程是一个非定常过程,但在研究中发现[2],适当的开孔和足够的开孔度可以避免伞衣上脱落涡环的产生,或者减少其尺寸,增加稳定性,大大减弱流场的非定常效应. 考虑到使用的模型是具有较大顶孔的平面圆形伞模型,在流场分析时考虑采用准定场假设,即认为每一个时间点处流场是定常的来进行分析.

采用 CFD (Computational Fluid Dynamics)方法研究开伞过程中的流场变化,解算器是 Fluent,使用 simple算法数值模拟求解 RNG(Renormalization Group) k-ε湍流模型下的雷诺平均 N-S (Navier-Stokes)方程以获得任意时刻的伞衣表面压力分布.

流固耦合计算中,首先根据初始数据,利用 CFD程序计算得出伞衣上压力分布,再代入多结点动力学模型中计算出新的伞衣形状,又把新的伞衣形状重新代入 CFD程序中以获得新的压力分布数据. 如此反复循环,直到达到稳定要求,输出结果,如图 5所示.

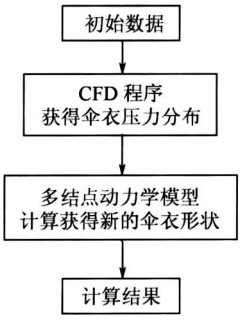


图 5 流固耦合计算流程图

伞绳初始时即拉直. 在耦合计算中,固体形状和流场更新的时间间隔为 0.01 s(变化剧烈时)或 0.02 s(变化不剧烈时).

在本研究中,考虑到实际中观察到开伞初始时伞衣在气流作用下会沿 y方向充分伸展,外形拉直成为一条直线,将降落伞的初始模型选为与 y轴负方向成 3外倾斜角的线段,这是本研究相对于以前研究的一大进步,因为以前的开伞研究[3]中一般事先假定初始伞衣顶部形状是球冠形,并且在开伞过程中始终保持这种形状,但在本

研究中不存在关于开伞过程中伞衣具体形状的假设,而是从贴合物理实际的初始模型基础上计算出了其形状的变化.

4　计算结果分析

模型在开伞时间到 0.72 s时加速度值为 3.16793 m/s^2,速度值为 6.37973 m/s,由于加速度值很小并且比较稳定,停止计算.

4.1　下降特性变化

4.1.1　开伞力变化

在图 6上可以看到,存在 2个明显的阻力峰值,分别发生在 0.06 s和 0.08 s,在这 2个时间点处开伞动载迅速增加,远大于稳定时的数值.

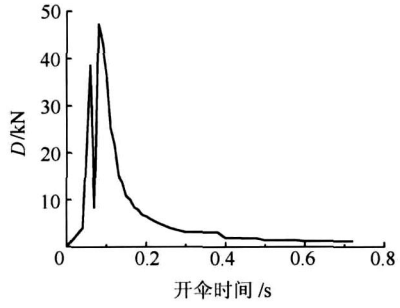


图 6　开伞气动阻力数值随时间变化曲线

在文献[4]中给出过一个典型的开伞力曲线图,明确指出开伞过程中存在 2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.同时,在关于 3个降落伞组成的集束式降落伞开伞试验研究报告中[5],也给出了每个降落伞开伞动载的剧烈变化特性.图 6中,利用多结点模型和 CFD程序的流固耦合计算再现了这 2个动载极值点,本研究中的开伞力曲线变化情况与 Watkins报告和 Calvin的实验给出的曲线变化情况在定性上是吻合的.

本研究中的阻力峰值和稳定值的比率远大于 Calvin的实验结果,同时实验结果得出的充气时间也较短.另外,由文献[6]中给出的充气时间经验计算公式可以算出本系统的充气时间约为 1.10 s,而在多结点模型计算仿真中,0.72 s时停止计算,考虑到此时加速度值较小,伞衣形状稳定,认为约 0.72 s时充气结束.

综合分析得出导致这些差异的 3个原因:

1)本研究中所使用的降落伞模型与 Calvin的实验模型有很大的差异. Calvin的模型尺寸(直径 0.3556m)和平均的回收物质量(22.7 kg)要低很多,其初始速度(13.41 m/s)也很小,因此会导致结果的差异.

2)本研究中不考虑伞衣的透气性,这会导致内外压差增加,涡尺寸增加.

3)本研究中对流场的变化使用了准定常假设,而它实际是非定常的.准定常假设会在数值模拟上导致伞衣上的涡长期无法脱落,其尺寸得到累积增长,引起内外伞衣压差数值在较长时间内保持大于真实数值的状态,从而导致降落伞在长时间内具有较大的开伞动载和加速度数值,相应的减少了开伞时间.

4.1.2　下降速度变化

初始下降速度值为 50 m/s, 0.72 s达到稳定下降状态时速度值为 6.37973 m/s 速度值随开伞时间增加剧烈下降,如图 7所示.

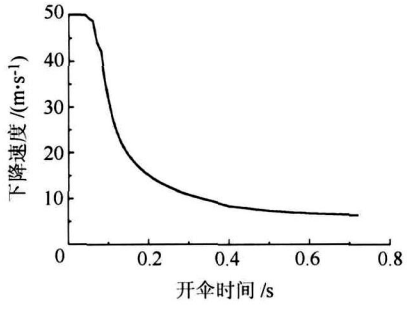


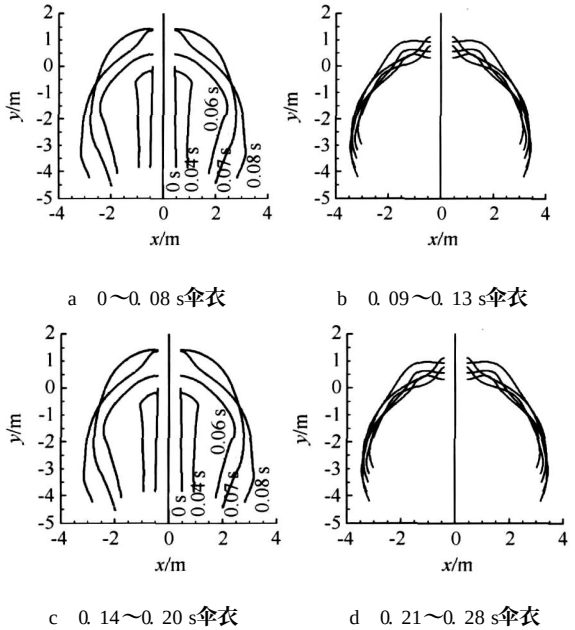
图 7　下降速度值随时间变化曲线

4.1.3　下降距离

从 0 s时开伞过程开始到 0.72 s时达到稳定下降状态,总的下降距离为 11.18763m.

4.2　伞衣形状变化

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 8a中可以看到伞衣在 0.08 s时的外形相对于 0.07 s时上部伞衣收缩.文献[7]在降落伞的实验



a　0～0.08 s伞衣　　b　0.09～0.13 s伞衣

c　0.14～0.20 s伞衣　　d　0.21～0.28 s伞衣

图 8　伞衣形状变化

研究中对这种振荡现象有过记述,称之为呼吸现象,现在利用多结点模型和 CFD流固耦合计算也可以仿真出这种现象.

5 结 论

使用多结点模型来模拟降落伞系统的结构,对坐标系进行转换后根据牛顿第二定律建立开伞过程中该模型的动力学方程组,再利用运动学方程组完善模型的动态仿真能力,使用 CFD流场解算程序,采用流固耦合方法对选定的平面圆形降落伞的开伞过程进行了仿真.经过结果分析和对比,证实了多结点模型在进行降落伞开伞过程动态仿真上的可行性和准确性,建立了一种降落伞流固耦合计算的新方法.

为了突破降落伞轴对称变形的限制,可以考虑将多结点模型分别应用于真实降落伞的每一幅伞衣上,并改为在三维坐标系统内实施模型计算,进行更加接近真实的开伞模拟.同时,如果能对流场进行非定常的解算,则能利用多结点模型的动力学方程组仿真出具有更高精度的开伞结果.

参考文献 (References)

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

[2] 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)

[3] Macha J M. A simple, approximate model of parachute inflation [R]. AIAA-93-1206, 1993

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

[5] Lee C K, Lanza J, Buckley J. Experimental investigation of clustered parachutes inflation[R]. AIAA-97-1478, 1997

[6] Doherr K F. Extended parachute opening shock estimation method[R]. AIAA-2003-2173, 2003

[7] 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)

[8] 王利荣.降落伞理论与应用[M].北京:中国宇航出版社, 1997: 287 - 320
Wang Lirong. Parachute: theory and application [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1997: 287 - 320 (in Chinese)

[9] 蒋崇文,曹义华,苏文翰.对称面圆周角对轴对称降落伞流场特性的影响[J].北京航空航天大学学报, 2006, 32(3): 271 - 275
Jiang Chongwen, Cao Yihua, Su Wenhan. Influence of circular angle in symmetric plane to the flow field characteristics of an axisymmetric parachute [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(3): 271 - 275 (in Chinese)

[10] 彭勇,张青斌,程文科,等.降落伞初始充气阶段数值模拟[J].中国空间科学技术, 2003(3): 7 - 12
Peng Yong, Zhang Qingbin, Cheng Wenke, et al. Simulation of parachute initial inflation phase[J]. Chinese Space Science and Technology, 2003(3): 7 - 12 (in Chinese)

[11] 张青斌,彭勇,程文科,等.降落伞拉直过程的质量阻尼弹簧模型[J].弹道学报, 2003, 15(1): 31 - 36
Zhang Qingbin, Peng Yong, Cheng Wenke, et al. A mass-spring model with damping to simulate the snatch process of parachute[J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(1): 31 - 36 (in Chinese)

(责任编辑:赵海容)