半球形伞流固耦合工程算法

宋乾福 曹义华 蒋崇文

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 降落伞流固耦合模拟非常难以实现,而一些工程设计任务要求迅速高效地完成.为了适应该要求,针对稳定下降阶段的半球形伞,提出了一种流固耦合工程算法.以轴对称伞形为伞衣初始形状,通过流场模拟得到结构模拟所需的伞衣压力系数分布,通过结构模拟得到新的伞衣外形,如此循环,直到伞衣中幅线和伞绳外形趋于稳定为止.结果表明,伞衣外形能迅速收敛,该方法能满足工程设计要求.

关 键 词: 降落伞; 半球形伞; 流固耦合; 工程分析

中图分类号: V 244.21^{+}6

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)01-0096-04

Engineering analysis method in fluid-structure interaction problem of hemispherical parachute

Song Qianfu Cao Yihua Jiang Chongwen

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To carry out fluid-structure interaction (FSI) parachute simulation is difficult, but some engineering design work demands that the operation completes quickly and efficiently. Therefore, to meet this requirement, an engineering fluid-structure interaction simulation method was established to simulate the stage of hemispherical parachute stable descent. Supposing the initial canopy shape is axis-symmetric, the canopy's pressure coefficient needed by structural simulation was computed from flow field simulation, and the new canopy shape was obtained from the structural simulation. This recycle procedure was repeated until the canopy gore centerline shape and parachute line shape were stable. The results show that the canopy shape can be quickly converged, and the method satisfies the engineering demands.

Key words: parachutes; hemispherical parachute; fluid-structure interaction; engineering analysis

降落伞数值模拟,主要涉及流场模拟和结构模拟以及二者的耦合,包含流体动力学和结构动力学的一系列复杂问题,如:湍流,伞衣大变形和伞衣变形过程的典型流固耦合问题等.

为了摆脱实验费用高和研究周期长等设计问题,从完全实验方法和半实验半理论方法发展到了完全理论方法.而其中的流固耦合数值模拟方法因更能真实地反映降落伞下降过程,因此得到了相对较大的重视,国内外出现了许多相关研究[1-4].但流固耦合模拟本身实现非常困难,对工程实际的应用更为不易,于是更多用于理论研究.为此本文对降落伞流固耦合工程算法作了一些研究.

降落伞流固耦合数值模拟,包含强耦合、中等耦合和松散耦合模拟[5].其中松散耦合模拟,即将上个时间步流体方程的计算结果传给结构方程并进行下个时间步的计算,由结构计算得到新的结果,然后再传给流体方程进行更进一时间步的计算.这种耦合方式能使计算速度大大提高,但是有可能使计算不稳定.

基于上述思想,本文针对某半球形伞,提出了适用于半球形伞稳定下降阶段的流固耦合工程算

收稿日期: 2008-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10577003)

作者简介: 宋乾福(1982-),男,四川广安人,博士生, chanfer@126.com.

法. 模拟计算表明, 使用该方法能使伞衣外形迅速收敛, 并且计算结果满足半球形伞的设计相关要求, 得到了相关部门的认可.

1　几何模型

本文针对某 8幅半球形伞进行几何建模. 半球形降落伞比平面圆形伞更为稳定, 该伞作为稳定伞使用[6]. 其示意图见图 1, 基本参数见表 1.

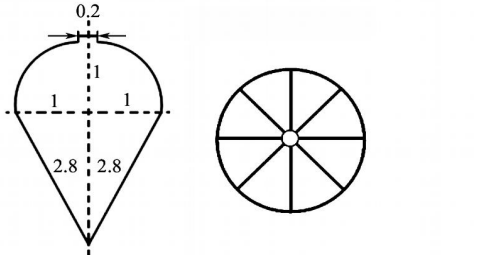

图 1　某半球形伞示意图 (单位: m)

表 1　某半球形伞基本参数

参数	底部直径 /m	顶孔直径 /m	名义面积 /m²	稳定下降速度 /(m·s⁻¹)	伞衣数 /幅
数值	2	0.2	6.283	6.0	8

2　工程流固耦合

2.1　算法思想

半球形伞稳定下降阶段流固耦合工程算法可用如图 2的流程图表示.

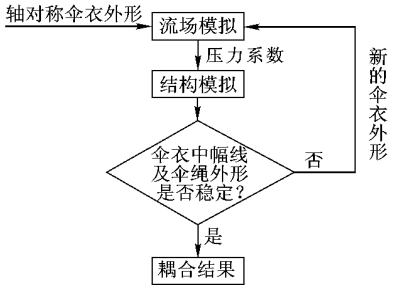

图 2　流固耦合工程算法流程图

首先利用 Fluent软件模拟得到降落伞稳定下降阶段的流场特性, 即用 SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent) 算法数值模拟求解剪切压力传输 SST (Shear Stress Transport) k-ω 湍流模型下的雷诺平均 N-S (Navier-Stokes)方程; 再根据得出的伞衣表面压力系数分布, 通过四阶龙格-库塔 (R-K)数值方法自编 FORTRAN 程序计算出伞衣中幅线和伞绳变形后的形状; 然后通过得到的结构外形计算出新的流场特性. 如此反复迭代, 当伞衣结构外形趋于稳定时迭代结束.

在流场模拟部分, 假定降落伞的形状是不发生改变的. 在结构模拟部分, 假定降落伞周围流场和施加在伞衣表面上的压力分布是不变的. 然而在真实的降落伞下落过程中, 降落伞的形状和降落伞周围的流场都时刻改变, 最后达到一个相对稳定的状态. 通过本方法对其进行了简化, 达到了工程计算的要求. 在通过多次迭代后可以得到伞衣中幅线和伞绳外形对比图, 进而可对降落伞是否达到稳定状态给以评价.

2.2　流场模拟

半球形伞稳定下降阶段的伞衣流场模拟, 主要目的是计算出结构模拟所需的压力系数分布以及显示降落伞的流场特性.

基本假设: ①降落伞的流场是定常的; ②降落伞迎角为 0°.

半球形伞稳定下降阶段初始流场计算, 采用轴对称模型. 根据半球伞的对称性, 取伞衣一幅 (图 3)进行研究. 利用 Gridgen生成的轴对称模型计算网格[7] (图 4), 并导出 Fluent软件所需的 CAS文件.

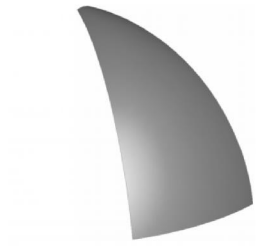

图 3　轴对称模型伞衣一幅



图 4　轴对称模型计算网格

用于传递结构模拟使用的压力系数为

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2} \tag{1}$$

式中, Δp 表示伞衣内外表面压力差; ρ表示空气密度; v_∞ 表示远前方来流速度.

伞衣阻力系数[8], 是降落伞设计的重要参数, 其理论值为 0.62~ 0.77[6], 表达式为

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2 A_0} \tag{2}$$

式中, D 表示伞衣所受阻力; A_0 表示伞衣名义面积.

采用 SIMPLEC算法 k-ω SST湍流模型, 通过 Fluent软件计算可得到, 用于结构模拟的沿伞衣子午线的无量纲压力系数, 以及用于显示伞衣流场特性的流线图、压力云图和阻力系数等.

2.3　结构模拟

半球形伞稳定下降阶段结构模拟[9], 主要目

的是在已知降落伞压力分布下, 在一定精度范围内计算出伞衣和伞绳的新形状.

基本假设: ①织物和伞绳均具有零弯曲刚度; ②所有伞衣幅和伞绳中的变形和应力是相同的; ③下降速度是稳定的.

即可以把充满时的伞衣视为弯曲松弛、无切应力、带有轴向对称载荷的空心模型. 充满时伞衣幅示意图如图 5所示.

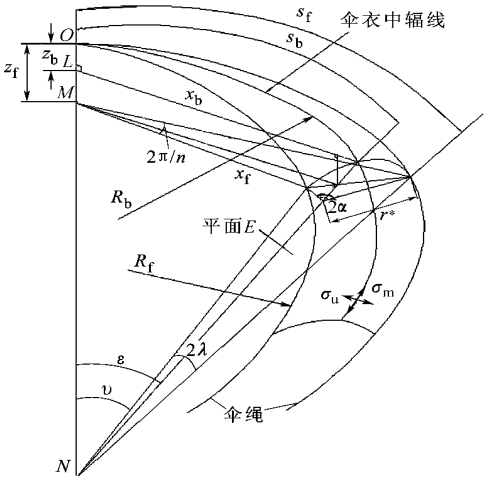

图 5 充满时伞衣幅的示意图

引入流场模拟所得的压力分布参数, 自编FORTRAN结构程序, 其中主要采用的方法有: 用四阶龙格-库塔数值解法近似求解由 6个一阶微分方程和 6个代数方程组成的方程组, 以及用牛顿迭代法求解一个较为复杂的超越方程[10], 分别见式(3) ~ 式(5). 最后得出的结果通过 Excel, Tecplot和 OriginLab等软件画出平面图形, 以及使用 Rhinoceros软件绘出三维图形.

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}R_f^*} &= \frac{1}{\sigma_m^*}\left(1+\frac{\sigma_m^*-K\sigma_u^*}{E_b^*}\right)\cdot\\
&\quad\left[C_p-\frac{\sigma_u^*}{r^*}\cos(\varepsilon-\varphi)\right]\\
\frac{\mathrm{d}\sigma_m^*}{\mathrm{d}R_f^*} &= \frac{\sigma_u^*}{r^*}\left(1+\frac{\sigma_m^*-K\sigma_u^*}{E_b^*}\right)\sin(\varepsilon-\varphi)\\
\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}R_f^*} &= \frac{2\sigma_u^*}{T^*}\left(1+\frac{T^*}{E_f^*}\right)\sin(\alpha-\lambda)\\
\frac{\mathrm{d}T^*}{\mathrm{d}R_f^*} &= 2\sigma_u^*\left(1+\frac{T^*}{E_f^*}\right)\cos(\alpha-\lambda)\cos\omega\\
\frac{\mathrm{d}x_f^*}{\mathrm{d}R_f^*} &= \left(1+\frac{T^*}{E_f^*}\right)\cos\upsilon\\
\frac{\mathrm{d}z_f^*}{\mathrm{d}R_f^*} &= \left(1+\frac{T^*}{E_f^*}\right)\sin\upsilon
\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

式中, φ表示降落伞轴线和伞衣幅中线的法线之间的夹角; R_f表示伞绳长度; σ_m 和 σ_u 表示沿子午线和切线方向上的应力; K 表示伞织物横向收缩系数; r表示伞衣幅曲率半径; T 表示伞绳力; x_f 和 z_f表示伞绳坐标; E_b 和 E_f表示伞织物和伞绳的弹性模量; υ, α, λ和 ε见图 5, 上标* 表示对相应参数的无量纲化.

$$\left.\begin{aligned}
r^*\sin\alpha &= x_f^*\sin\frac{\pi}{N}\\
\alpha r^* &= \left(1+\frac{\sigma_u^*-K\sigma_m^*}{E_b^*}\right)\frac{\pi}{N}\sin R_f^*\\
\sigma_u^* &= \frac{C_p r^* T^*}{2\sigma_m^* r^*\sin(\alpha-\lambda)+T^*\cos(\varepsilon-\varphi)}\\
\sin\lambda &= \sin\frac{\pi}{N}\sin\upsilon\\
\sin\varepsilon &= \frac{\sin\upsilon}{\cos\lambda}\cos\frac{\pi}{N}\\
\sin\omega &= \frac{\cos(\pi/N)}{\cos\lambda}
\end{aligned}\right\}\quad(4)$$

式中, N 表示伞衣幅数; ω表示平面 E 与相邻伞衣幅中相对平面的夹角.

$$\alpha=\frac{\frac{\pi}{N}\sin R_f^*\,(E_b^*-K\sigma_m^*)}{x_f^*E_b^*\sin\frac{\pi}{N}}\sin\alpha+\frac{\frac{C_p\sin R_f^*\,\frac{\pi}{N}}{E_b^*\cos(\varepsilon-\varphi)\sin\alpha}}{\frac{2\sigma_m^*x_f^*\sin\frac{\pi}{N}}{T^*\cos(\varepsilon-\varphi)}\sin(\alpha-\lambda)+\sin\alpha}\quad(5)$$

3 计算结果及分析

五步计算迭代结束后, 得到伞衣中幅线变化比较图(图 6)和伞绳的变化比较图(图 7), 其中1/4圆弧线分别表示伞衣中幅线和伞绳的初始形状, 其余表示迭代后的相应形状. 可见迭代耦合计算后的中幅线和伞绳形状已基本稳定, 可以认为已经得到了稳定的降落伞形状, 流固耦合计算完成.

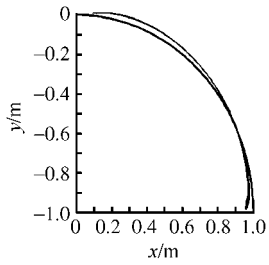

图 6 伞衣中幅线的变化比较

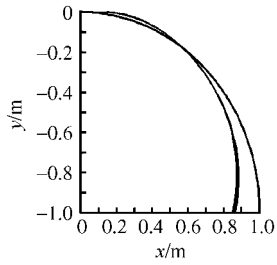

图 7 伞绳的变化比较

最后得到伞衣稳定状态下工程设计要求的最终结果: 稳定状态下的伞衣和伞绳三维图 (图 8). 进一步还可以得到反映流场特性的沿伞衣中幅线流线图 (图 9)、沿伞衣中幅线截面压力云图 (图 10相对压强的参考值为 101 325 Pa)以及最终的阻力系数 0. 647(满足文献 [6]所给阻力系数范围: 0. 62~ 0. 77要求)等.

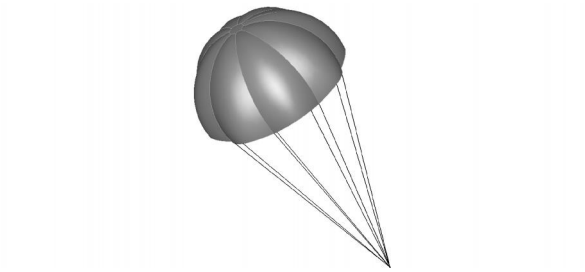

图 8　稳定状态下伞衣和伞绳三维图

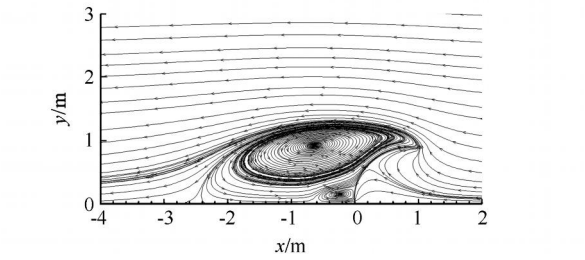

图 9　伞衣稳定状态下沿伞衣中幅线流线图

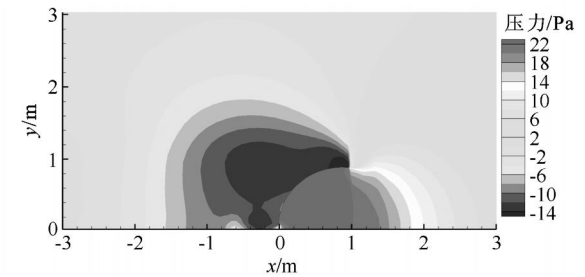

图 10　伞衣稳定状态下沿伞衣中幅线截面压力云图

从以上结果分析可以看出, 对半球形伞稳定下降阶段采用本流固耦合工程算法模拟, 伞衣中幅线和伞绳能较快趋于稳定, 并且结果满足工程设计要求.

4　结 束 语

本文针对稳定下降阶段的半球形伞, 提出了一种流固耦合工程算法. 作为松散流固耦合数值模拟的发展算法, 模拟结果较为成功地满足了工程设计要求. 说明利用松散流固耦合模拟思想, 在一定程度上可以较好地应用于工程实际. 可以考虑进一步研究在其它伞形和不同下降阶段的降落伞流固耦合工程算法.

参考文献 (**References**)

[1] Stein K, Benney R, Tezduyar T, et al. 3-D computation of parachute fluid-structure interactions performance and control[R]. AIAA-99-1714, 1999

[2] Johari H, Desabrais K J. A coupled fluid-structure parachute inflation model[R]. AIAA-2003-2146, 2003

[3] Tutt B A, Taylor A P, Berland J C, et al. The use of LS-DYNA to assess the performance of airborne systems north america candidate ATPS main parachutes[R]. AIAA-2005-1609, 2005

[4] 潘星, 曹义华. 降落伞开伞过程的多节点模型仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(2): 188- 192
Pan Xing, Cao Yihua. Simulation of parachute's opening process with multi-node model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(2): 188- 192(in Chinese)

[5] 彭勇, 张青斌, 宋旭民, 等. 降落伞充气过程研究方法综述 [J]. 中国空间科学技术, 2004, 6(3): 38- 44
Peng Yong, Zhang Qingbin, Song Xumin, et al. Summary for the research methods of parachute inflation process[J]. Chinese Space Science and Technology, 2004, 6(3): 38- 44(in Chinese)

[6] Ewing E G, Bixby H W, Knacke T W. Recover system design guide[R]. Technical Report AFFDL-TR-78-151, 1978: 75- 88

[7] Sahu J, Cooper G, Benney R. 3-D parachute descent analysis using coupled CFD and structural codes[R]. AIAA-95-1580-CP, 1995

[8] 王利荣. 降落伞理论与应用 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1997: 45
Wang Lirong. Parachute: theory and application[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1997: 45 (in Chinese)

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

[10] 蒋崇文. 降落伞流固耦合动力学研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2006
Jiang Chongwen. Research of parachute fluid-structure interaction dynamics[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006 (in Chinese)

(责任编辑: 赵海容)