

文章编号 :1001 - 2486(2004)02 - 0013 - 04

降落伞主充气阶段数值模拟*

彭 勇,张青斌,秦子增

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要 建立了降落伞主充气模型。前体、伞绳及伞衣离散为一系列弹性连接的质量节点,伞衣内部流场为二维无粘、不可压流。利用模型计算了主充气阶段伞衣形状变化、伞衣投影面积变化及伞绳张力。计算结果与试验结果进行了比较,相当吻合。

关键词 主充气;质量阻尼弹簧模型;伞衣投影面积;伞绳张力

中图分类号:V414.34 文献标识码:A

Simulation of Parachute Final Inflation Phase

PENG Yong, ZHANG Qing-bin, QIN Zi-zeng

(College of Aerospace and Material Technology, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A final inflation model for parachutes was established. The forebody, suspension lines and canopy were modeled as a series of elastically connected mass nodes. The flow field inside the canopy was two-dimensional inviscid, incompressible flow. The model was used to calculate the variations of the canopy shape, the variations of canopy projection area and the tension of the suspension line during the final inflation phase. Numerical results were compared with the experimental data and found to be in agreement.

Key words final inflation; mass spring damper model; canopy projection area; tension of suspension line

降落伞充气过程是指从伞系统全长拉直起到伞衣充满为止的整个过程,它是一个复杂的时变过程。对充气过程的研究历来是伞研究领域的难点,原因主要是:伞衣为柔性织物,在充气过程中,伞衣经历大变形,伞衣存在皱褶现象,伞衣周围流场复杂,伞衣结构变形与流场变化相互耦合。习惯将充气过程分为两个阶段来研究:初始充气阶段及主充气阶段。初始充气阶段是指气流从伞衣底边冲到伞衣顶部的过程,主充气阶段是指空气在伞衣顶部聚集,顶部首先膨胀,然后膨胀向底边扩张的过程。本文只对主充气阶段进行了数值模拟,不涉及初始充气阶段。从降落伞的产生以后,充气过程的研究方法发生了很大变化。根据开伞载荷及充满时间的求解方法,可以分为试验方法、基于试验的工程模型法和数值分析法(CFD方法和涡元法(VEM))。试验方法有开伞载荷系数法等。基于试验的工程模型法有多种,其中Wolf充气模型首次把伞的轴向及径向动量方程与系统运动方程联合起来进行求解^[3],与那些基于质量守恒或特定伞—直径—时间相互关系的充气模型相比,这是一个较大的进步。Macha模型^[4]对Wolf模型进行了改进,Macha模型的创新点在于径向力可用容易测得的阻力和收口绳张力表示。不过这些模型都没有反映出实际充气过程中流固耦合的问题。Sundberg和Purvis采用简单的有限元模型与二维气流模型相结合的方法来研究充气过程,开始考虑流固耦合^[5,6]。最近几年,随着计算机科学、流体力学数值计算方法及结构动力学数值计算方法的发展,开始将基于网格的CFD方法或涡元法与有限元方法运用到伞充气过程流固耦合的仿真计算中。这种方法是充气过程研究的发展趋势,不过所需计算量巨大,一般在巨型机上进行计算。新型伞的设计工作在伞的初步设计阶段通常需要反复修改,采用这种大计算量的方法会延长研制周期,增加研制费用。从设计方法的优化角度分析,在初步设计阶段完全可以采用较简单的充气模型进行仿真计算及辅助设计。

* 收稿日期 2003 - 10 - 10

作者简介 彭勇(1966—),男,博士生。

1 伞系统质量阻尼弹簧模型

典型的伞系统由伞衣、伞绳、吊带、回收物等几个主要部件组成。伞衣由一定数量的相同伞衣幅彼此缝合连接而成。在对称充气情况下,伞系统保持结构上的轴对称,因此取轴对称的一对伞衣幅、一对伞绳及回收物作为研究对象。回收物的质量取总质量的 $2/N$, N 为伞衣幅的数目。将伞衣、伞绳及回收物离散为一系列质量节点,节点之间用无质量的阻尼弹簧相连。其中回收物简化为一个质量节点,忽略其上的气动力。伞系统体坐标系定义如下: x 轴为伞系统纵轴, y 轴垂直于 x 轴。

2 气流模型

2.1 基本假设

- (1) 对称充气;
- (2) 主充气开始前伞衣为标准圆柱形状;
- (3) 伞衣内部气流为二维不可压、无粘流动;
- (4) 忽略伞衣外流场变化。

2.2 方程推导

使伞衣张开的力主要是伞衣内部气流的径向分量,因此只需建立径向动量方程。

径向欧拉方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中, v 为伞衣内部气流的径向速度; u 为伞衣内部气流的轴向速度; ρ_∞ 为伞衣内部气流的密度; P 为伞衣内部气流的压力。

对式(1)进行积分,积分起始点是伞衣对称轴,积分终点是伞衣节点所在径向位置。在积分过程中主要考虑到:沿轴向的对流项 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 与 v 及 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 相比是小量,忽略 $u \frac{\partial v}{\partial x}$ 项^[9];同时,径向加速度沿径向线性变化。积分式(1)得到:

$$P_{in} = P_\infty + \frac{1}{2} \rho_\infty (u_i^2 - y_i^2 \dot{y}_i - \dot{y}_i^2) \quad (2)$$

式中, P_{in} 为 i 节点处伞衣内部压力; P_∞ 为节点处伞衣外部压力; u_i 为 i 节点处气流在伞衣对称轴方向的速度。

u_i 可以由 i 与 $i-1$ 之间流体单元的质量守恒方程得到(如图1所示):

$$\frac{d(\rho_\infty V_i)}{dt} = \pi \rho_\infty [y_i^2 (\dot{x}_i - u_i) - y_{i-1}^2 (\dot{x}_{i-1} - u_{i-1})] \quad (3)$$

式中, V_i 为 i 与 $i-1$ 之间流体单元的体积; u_{i-1} 为 $i-1$ 节点处的气流沿纵轴的平均速度。将 i 与 $i-1$ 之间流体单元简化为柱台,则得其体积为:

$$V_i = \frac{1}{3} \pi (x_i - x_{i-1}) (y_i^2 + y_{i-1}^2 + y_i y_{i-1}) \quad (4)$$

于是可以得到:

$$u_i = \dot{x}_i - [\dot{V}_i + \pi y_{i-1}^2 (\dot{x}_{i-1} - u_{i-1})] / \pi y_i^2 \quad (5)$$

对节点 $i=1$:

$$u_i = \dot{x}_i - \dot{V}_i / \pi y_i^2 \quad (6)$$

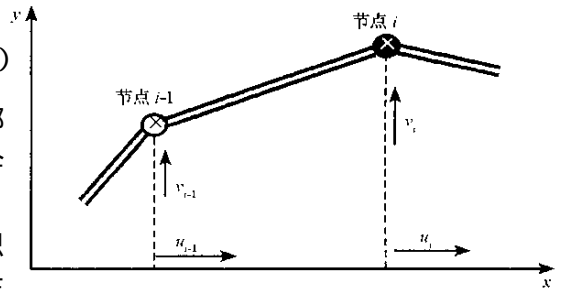


图1 流体单元
Fig.1 The cell of flow in canopy

3 伞系统动力学方程

伞系统各质量节点在运动中受到气动力、张力及重力的作用,对每个节点用牛顿第二定律可得到:

$$\mathbf{a} = [m_i g_x + (A_{i+1/2} + A_{i-1/2})/2 + T_{i+1/2} - T_{i-1/2}] / m_i \quad (7)$$

式中 \mathbf{a}_i 为 i 节点的加速度; m_i 为 i 节点的质量; g_x 为重力加速度的轴向分量; $A_{i+1/2}$ 为 i 节点与 $i+1$ 节点之间单元的气动力; $A_{i-1/2}$ 为 i 节点与 $i-1$ 节点之间单元的气动力; $T_{i+1/2}$ 为 i 节点与 $i+1$ 节点之间单元的张力; $T_{i-1/2}$ 为 i 节点与 $i-1$ 节点之间单元的张力。

$$T_{i+1/2} = E_{i+1/2} A_{i+1/2} \epsilon_{i+1/2} + B_{i+1/2} \dot{\epsilon}_{i+1/2} \quad (8)$$

式中 $E_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元弹性模量; $A_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元横截面积; $\epsilon_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元应变; $B_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元阻尼系数; $\dot{\epsilon}_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元应变率。

$$\epsilon_{i+1/2} = (s_{i+1/2} - s_{0i+1/2}) / S_{0i+1/2} \quad (9)$$

式中 $s_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元长度; $s_{0i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元原长。

$$\dot{\epsilon}_{i+1/2} = \dot{s}_{i+1/2} / s_{0i+1/2} \quad (10)$$

$$s_{i+1/2} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (11)$$

$$\dot{s}_{i+1/2} = [(x_{i+1} - x_i)(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + (y_{i+1} - y_i)(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i)] / s_{i+1/2} \quad (12)$$

$$A_{xi+1/2} = -A_{Ni+1/2} \sin \theta_i + A_{Ai+1/2} \cos \theta_i \quad (13)$$

$$A_{yi+1/2} = A_{Ni+1/2} \cos \theta_i + A_{Ai+1/2} \sin \theta_i \quad (14)$$

式中 $A_{xi+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元上气动力在 x 轴方向投影; $A_{yi+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元上气动力在 y 轴方向投影; $A_{Ni+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元上法向气动力; $A_{Ai+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元上切向气动力。

对伞绳部分节点:

$$A_{Ni+1/2} = -\frac{1}{2} \rho_\infty v_{Ni+1/2} |v_{Ni+1/2}| S_{i+1/2} C_N \quad (15)$$

式中 ρ_∞ 为空气密度; $v_{Ni+1/2}$ 为 i 节点速度在 $i+1/2$ 单元法向上的投影; $S_{i+1/2}$ 为 $i+1/2$ 单元的特征面积; C_N 为 $i+1/2$ 单元的法向气动力系数。

$$A_{Ai+1/2} = -\frac{1}{2} \rho_\infty v_{Ai+1/2} |v_{Ai+1/2}| S_{i+1/2} C_A \quad (16)$$

式中 $v_{Ai+1/2}$ 为 i 节点速度在 $i+1/2$ 单元切向上的投影; C_A 为 $i+1/2$ 单元的切向气动力系数。

对伞衣部分节点 $A_{Ni+1/2}$ 由式(15)得到; $A_{Ai+1/2}$ 由式(16)得到。

4 计算结果

4.1 主充气过程伞形变化

针对名义面积为 24m^2 的伞,利用模型计算其主充气阶段伞形变化,结果如图 2(a)所示。图 2(b)为空投试验中拍摄到的主充气阶段伞形变化。比较可以发现,模型计算所得主充气过程与实际主充气过程非常相似,空气首先在伞衣顶部聚集,使伞衣顶部膨胀,然后膨胀部分向伞衣底边扩展,直到伞衣完全张满。

4.2 主充气阶段伞衣投影面积变化

针对名义面积为 24m^2 的伞,气流速度为 190m/s ,利用模型计算伞衣投影面积随时间的变化,结果如图 3 所示。图 4 为实际充气过程中伞衣投影半径的变化规律。比较图 3 与图 4 发现,模型计算所得伞衣投影面积变化规律与实际情况相符。

4.3 伞绳张力

针对某带条伞,在伞绳数目为 24 根,气流速度为 190m/s 情况下,试验得到开伞力峰值近似为 87000N 。模型计算所得开伞力峰值近似为 $4100 \times 24 = 98400\text{N}$ 。可见计算结果与试验结果基本吻合。

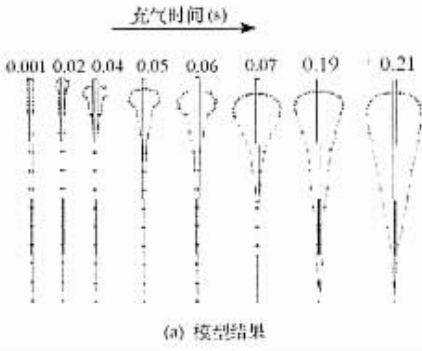


图2 主充气阶段伞形变化

Fig.2 The variation of canopy shape in final inflation phase

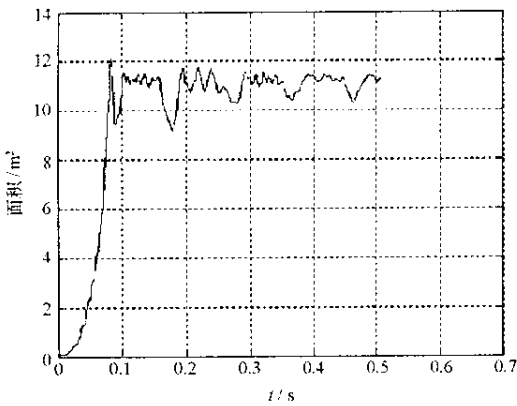


图3 计算所得伞衣投影面积

Fig.3 Canopy project area calculated by model

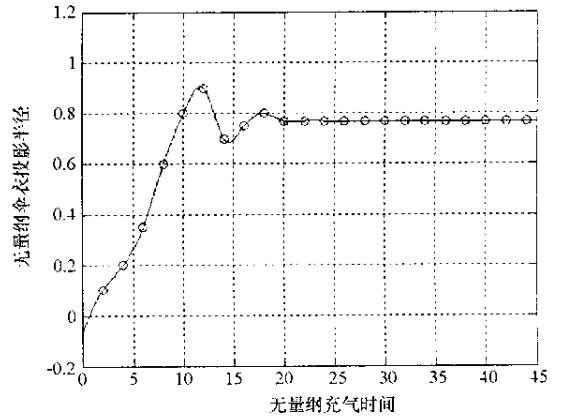


图4 实际充气过程伞衣投影半径

Fig.4 The variation of canopy project radius

5 结论

利用模型计算得到了主充气阶段伞形变化、伞衣投影面积变化及伞绳张力三个方面的结果,通过与试验结果比较说明模型基本正确。与 Wolf、Macha 等的模型相比,本文模型考虑了流固耦合,对试验依赖性减小。与 CFD 结合有限元方法的充气模型相比,本文模型具有计算量小的特点。通过增加伞系统节点的数目,计算结果很快收敛。对 24m² 的伞,节点数只需 40 个即可使结果达到一定精度,可见模型计算量不大,可用于新伞型的初步设计。

参考文献:

- [1] 尤因 等.回收系统设计指南[M].北京:航空工业出版社,1989.
- [2] 王利荣.降落伞理论与应用[M].北京:宇航出版社,1997.
- [3] Wolf D F. A Simple Dynamic Model of Parachute Inflation[J]. J. Aircraft,1974,11(1).
- [4] Macha J M. A Simple, Approximate Model of Parachute Inflation[C]. AIAA-93-1206,1993.
- [5] Purvis J M. Numerical Prediction of Deployment, Initial Fill, and Inflation of Parachute Canopies[C]. AIAA-84-0787,1984.
- [6] Sundberg W D. Finite Element Modeling of Parachute Deployment and Inflation[C]. AIAA-75-1380,1975.
- [7] Purvis J M. Prediction of Line Sail During Lines-First Deployment[C]. AIAA-83-037,1983.

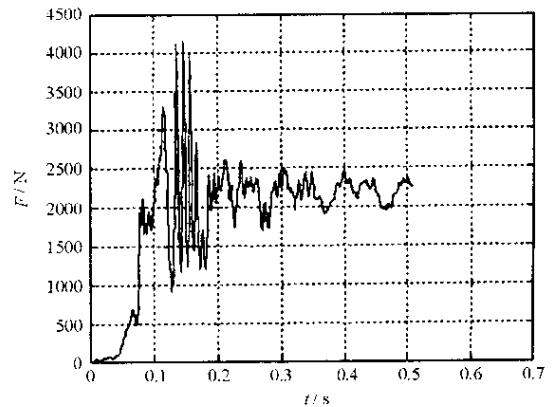


图5 模型计算所得单根伞绳张力

Fig.5 The tension in a suspension line calculated by model

