

末敏弹减速伞充气运动建模与仿真^{*}

徐 刚^{1,3}, 耿汝波³, 殷克功^{2,3}

(1 空军工程大学工程学院, 西安 710038; 2 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;
3 徐州空军学院, 江苏徐州 221003)

摘 要:针对降落伞具有非线性柔性变形的特点,应用了有限元技术来建立末敏弹减速伞充气运动模型。首先将减速伞三维模型离散成粒子系统,在考虑伞衣结构内力和内部气流运动基础上,建立充气运动的粒子节点动力学模型,其模型仿真计算结果与风洞实验的伞形运动变化、投影直径变化和动载变化规律基本一致。该理论研究非常适合在新型末敏弹减速伞的初步设计中应用。

关键词:末敏弹;充气过程;有限元;降落伞

中图分类号:TJ413.9 文献标志码:A

Modeling and Simulation Research on Drag Parachute Inflation Motion of Target-sensitivity Projectile

XU Gang^{1,3}, GENG Rubo³, YIN Kegong^{2,3}

(1 The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2 School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China;
3 Xuzhou Air Force Academy, Jiangsu Xuzhou 221003, China)

Abstract: Aiming at parachute having nonlinear flexible deformation features, finite element technology was applied to modeling and simulation research on drag parachute inflation motion of target-sensitivity projectile (TSP). Particle system is used to construct the 3D model of drag parachute. On the basis of considering the inner force in the canopy and the flow field inside it, the dynamics models during inflation process is built in the form of mass particles, and the numerical results through the simulation are validated to be in basic agreement with experiment's results. This research adapts to be used for an elementary design in the drag parachute of new TSP.

Keywords: target-sensitivity projectile; inflation process; finite element; parachute

0 引言

末敏弹是一种需减速并进行稳态扫描的灵巧弹药,主要用于摧毁敌方装甲目标。大多数末敏弹均采用减速伞作为减速装置;在减速伞运动研究过程中,除了关心伞充满气后的稳定减速运动规律之外,还关心其弹伞系统充气过程的运动规律。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^[1]。关于该过程的研究,通常采用物理试验方法^[3-5]。目前已经发展起来的连续媒质力学方法,如有限元法、有限体积法及非连续的粒子系统等,这些方法在柔性物体变形中得到广泛应用^[6-8]。文中针对降落伞具有非线性柔性变形

的特点,结合有限元技术,在考虑伞衣结构内力和内部气流运动基础上,建立伞系统充气运动的动力学模型,并对其进行仿真。

1 伞系统有限元几何模型

设计末敏弹减速伞衣为一个平面圆伞;该伞由一定数量的相同伞衣幅彼此缝合而成,伞衣幅间、伞顶孔和伞衣底边都用织物带加强。由于伞衣是网状编织物,与薄壳结构相似。在力学上,对板壳结构已经有一套比较成熟的理论,也有关于有限元分析和有限差分法等成熟的数值分析方法,因此,从有限元数值分析方法入手进行建模是十分自然的。

文中定义伞系统坐标系下几何模型如图 1

^{*} 收稿日期:2008-04-10

作者简介:徐刚(1977-),男,辽宁开原人,讲师,博士研究生,研究方向:系统仿真、虚拟现实技术。

所示,图中的伞衣、伞绳离散为一系列质量粒子,粒子间用无质量、自然长度不为 0 的弹簧连接,并且弹体简化成一个质点。

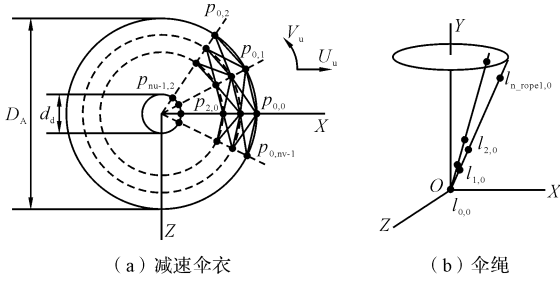


图 1 减速伞系统有限元结构示意图

设伞衣的展开直径为 D_A , 伞透气孔直径为 d_d ; 单根伞绳长度为 L , 伞弹之间共有 n_L 根伞绳; 从伞衣中心为起点、沿伞衣半径方向(径向)定义为 U_u 方向, 绕 OY 轴逆时针方向定义为伞衣的 V_u 方向, 那么设 U_u 方向有限元粒子列数为 n_u , V_u 方向有限元粒子行数为 n_v , 设 n_L 和 n_u 有关系等式: $n_v = k_u \cdot n_L$, $k_u = 1, 2, \dots$. 因此伞衣的有限元粒子矩阵为:

$$P_{u_particle} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{1,0} & \cdots & p_{n_u-1,0} \\ p_{0,1} & p_{1,1} & \cdots & p_{n_u-1,1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{0,n_v-1} & p_{1,n_v-1} & \cdots & p_{n_u-1,n_v-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理, 伞绳有限元粒子矩阵:

$$P_{r_particle} = \begin{bmatrix} l_{0,0} & l_{1,0} & \cdots & l_{n_rope-1,0} \\ l_{0,1} & l_{1,1} & \cdots & l_{n_rope-1,1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{0,n_L-1} & l_{1,n_L-1} & \cdots & l_{n_rope-1,n_L-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

伞衣有限元粒子矩阵中, 弹簧的连接方式主要有 3 种:

- ① 连接粒子 $[i, j]$ 与 $[i+1, j]$, $[i, j]$ 与 $[i, j+1]$ 的弹簧, 称为结构弹簧。
- ② 连接粒子 $[i, j]$ 与 $[i+1, j+1]$, $[i+1, j]$ 与 $[i, j+1]$ 的弹簧, 称为剪切弹簧。
- ③ 连接粒子 $[i, j]$ 与 $[i+2, j]$, $[i, j]$ 与 $[i, j+2]$ 的弹簧, 称为弯曲弹簧。

这三种弹簧分别用于与结构力(主要是张力)、剪力和弯矩相关的计算。

2 伞系统粒子动力学模型

对于伞衣部分, 主要考虑粒子受到重力、气

动力、粒子间张力、剪切力和弯曲力的作用, 每个粒子 $p_{i,j}$ 用牛顿第二定律得到:

$$a_{p_{ij}} = (m_{u_particle} g + P_{p_{ij}} + \sum T_{p_{ij}} + \sum T_{cp_{ij}} + \sum T_{sp_{ij}}) / m_{u_particle} \quad (3)$$

其中: $a_{p_{ij}}$ 表示伞衣粒子 $p_{i,j}$ 合加速度; $P_{p_{ij}}$ 表示粒子的气动力; $\sum T_{p_{ij}}$ 为粒子 $p_{i,j}$ 的合张力; $\sum T_{cp_{ij}}$ 为粒子 $p_{i,j}$ 的合剪切力; $\sum T_{sp_{ij}}$ 为粒子 $p_{i,j}$ 的合弯曲力, 对于柔软密织物的伞衣, 该力与其它两个结构力相比很小, 可以忽略合弯曲力; $m_{u_particle}$ 为粒子质量: $m_{u_particle} = m_u / (n_v \times n_u)$, m_u 为伞衣质量。

对于伞绳部分, 主要考虑粒子受到重力、气动阻力和伞绳张力的作用, 得到:

$$a_{l_{ij}} = (m_{l_particle} g + R_{l_{ij}} + \sum T_{l_{ij}}) / m_{l_particle} \quad (4)$$

式中: $a_{l_{ij}}$ 表示伞绳粒子合加速度; $\sum T_{l_{ij}}$ 表示伞绳某个粒子合张力; $m_{l_particle}$ 为粒子质量: $m_{l_particle} = m_l / (n_rope \times n_L)$, m_l 为伞绳质量; $R_{l_{ij}}$ 表示伞绳粒子气动阻力^[1]:

$$R_{ij} = -\frac{1}{2} \rho v_{ij}^2 C_{vis} A_w \quad (5)$$

式中: ρ 表示空气密度, v_{ij} 表示粒子速度, C_{vis} 为伞绳的气动力系数, A_w 为伞绳横截面积; 气动力方向与粒子运动速度方向相反。

式(3)、式(4)中的伞绳张力 $T_{l_{ij}}$ 、伞衣张力 $T_{p_{ij}}$ 和剪切力 $T_{cp_{ij}}$ 由式(6)计算:

$$T_{ij} = \left[k_s (|l| - r) + k_d \frac{l' \cdot l}{|l|} \right] \frac{l}{|l|} \quad (6)$$

其中: k_s 是虎克弹性系数, k_d 是阻尼系数, 不同类型的弹簧具有不同的 k_s 和 k_d 的值, 这两个值是体现具体伞衣料、织物带和伞绳性能的主要因素; r 是该弹簧的自然长度, l 是粒子间的位移矢量差, $|l|$ 是两粒子的距离, l' 是 l 对时间的导数, 即粒子间的速度矢量差。

使伞衣张开的力主要是伞衣内部气流的径向分量, 充气过程中近似看作对称充气, 忽略伞衣外流场变化, 设伞衣内部气流为不可压、无粘流动, 建立径向动量方程:

$$\frac{\partial v_u}{\partial t} + v_u \frac{\partial v_u}{\partial u} + v_y \frac{\partial v_u}{\partial y} = f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial u} \quad (7)$$

式中: v_u 为伞衣内部气流的径向速度; v_y 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; u 为伞衣充气径向矢量位移; f_u 为径向质量力。对该式积分, 积分起始点是伞衣对称轴, 积分终点是伞衣节点所在径向

矢量位置,忽略其质量力,得到粒子所在位置的气动力:

$$P_{p_{ij}} = P_{in} - P_{\infty} = \frac{1}{2} \rho (v_y^2 - \mathbf{u}_{ij} \ddot{\mathbf{u}}_{ij} - \dot{\mathbf{u}}_{ij}^2) \quad (8)$$

式中: P_{in} 表示伞衣粒子 $p_{i,j}$ 节点处内部压力; P_{∞} 表示伞衣粒子 $p_{i,j}$ 节点处伞外部压力, \mathbf{u}_{ij} 表示粒子 $p_{i,j}$ 节点的径向位置矢量。

3 仿真计算与一致性验证

3.1 充气过程伞形运动变化

某型末敏弹减速伞采用 8 幅平面圆形伞,伞衣直径为 0.35m,利于模型计算其主充气阶段伞形变化,结果如图 2(a),图 2(b)是风洞实验时高速摄像机拍摄到的充气伞形变化;其中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,并且伞衣充满瞬间的伞衣直径往往先是超过稳定时的投影直径,以后才收缩到稳定时的直径,这种现象符合“过度充气”^[1]实际情况。

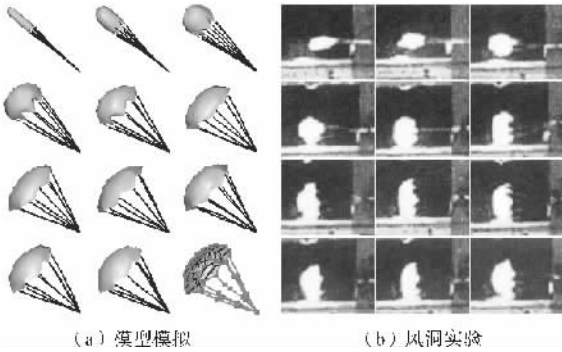


图 2 减速伞充气伞形变化

3.2 伞衣投影直径变化

气流速度为 70m/s,利用模型计算伞衣投影直径随时间的变化,结果如图 3 的实线所示,虚线表示风洞实验充气过程中伞衣投影直径的变化规律,比较结果,模型计算所得伞衣投影直径变化规律与实际情况相符。

3.3 减速伞开伞动载变化

伞绳数目为 8 根,气流速度为 70m/s 情况下,开伞期间认为弹体无位移,模型计算所得开伞动载如图 4 的实线所示,虚线表示风洞实验采集的开伞载荷变化规律,从图形观察可知:计算曲线结果与实验结果曲线趋势基本一致。

综上所述,从充气阶段的伞形运动变化、投影直径变化和伞衣载荷变化规律对比,其仿真结果与实际风洞实验采集数据结果基本一致,可以

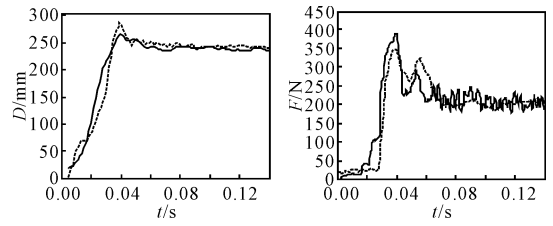


图 3 减速伞投影直径变化 图 4 无限质量下伞衣动载变化

认为采用有限元方法的充气阶段运动模型是有效、正确的。

4 结论

文中运用有限元方法将弹伞系统离散成弹簧相连的有质量的粒子节点,在三维空间中考虑了与伞衣结构相关的力,主要包括张力、剪切力和弯曲力,以及考虑了伞衣内部气流运动力,建立了粒子节点的动力学模型,通过仿真计算,其结果与风洞实验的减速伞系统的伞形变化、投影直径变化和伞衣载荷变化规律基本一致。

总之,将有限元方法应用在末敏弹减速伞充气运动建模和仿真研究中,建模和仿真容易实现,对物理试验依赖性较小,并且与伞的构造参数结合紧密,适合在新型末敏弹减速装置的工程设计中应用。

参考文献:

- [1] 王利荣. 降落伞理论与应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1997.
- [2] 彭勇, 程文科, 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, 24(3): 38-44.
- [3] 刘世平, 韩子鹏, 宋太阳, 等. 末敏弹系统开伞过程的模拟试验方法及应用分析研究[J]. 兵工学报, 1998, 19(2): 171-175.
- [4] Ewing E G, Bixby H W, Knacke T W. 回收系统设计指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 1988.
- [5] 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.
- [6] W R Yu. Drape simulation of woven fabrics by using explicit dynamics analysis[J]. Journal of the Textile Inst, 2000, 2: 285-301.
- [7] Jinlian Hu. Garment drape simulation for a new-generation CAD system[J]. Textile Asia, 2001 (4): 25-27.
- [8] D E Breen. A particle based model for simulating the draping behavior of woven cloth[J]. Textile Research, 1994(11): 663-685.