

# 空间飞网两种动力学模型的比较研究

李京阳<sup>1)</sup> 于 洋 宝音贺西 李俊峰

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

**摘要** 空间飞网由轻质绳索编织, 通过抛撒展开形成一定构型的网, 在空间在轨服务、飞行器回收、轨道清理、空间拦截等领域具有巨大的应用潜力. 采用非线性有限元软件 ABAQUS 建立柔性模型与松弛飞网模型, 对两种飞网模型的抛撒展开进行了对比, 提出了飞网展开效果的衡量标准, 重点讨论了不同工况下牵引质量块质量、抛射角度、抛射速度和绳索等效阻尼的影响. 仿真表明, 松弛模型的展开效果优于柔性模型; 牵引质量块质量、抛射速度与绳索结构阻尼主要决定飞网的展开, 抛射角度是影响飞网在预定位置展开面积的关键因素.

**关键词** 空间飞网, 非线性有限元, 松弛绳网, 动力学仿真

中图分类号: V476.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)03-0542-09

## 引 言

飞网捕获是一种新型航天器概念, 可以实现远距离、宽范围和误差容错捕获, 比传统的机械臂, 其控制机构更为简单, 能耗更小. 在空间在轨服务、飞行器回收、轨道清理、空间拦截等领域具有巨大的应用潜力, 受到国际空间技术领域越来越广泛的关注<sup>[1]</sup>. 2001 年, 欧空局提出利用飞网抓捕地球静止轨道废弃卫星的 ROGER 项目<sup>[2]</sup>, 用于研究卫星服务系统的可行性, 解决地球静止轨道资源日趋紧张的问题. MXER 项目是 NASA 空间推进计划正在支持的 5 个研究方向之一<sup>[3-4]</sup>. 该项目利用绳系系统提供不消耗推进剂的推进. 在该任务中, 轨道上运行的旋转绳系系统捕捉有效载荷, 并在合适的位置上释放, 绳系系统的动量转移给有效载荷, 从而使有效载荷进入高能量轨道, 绳系系统进入较低的轨道. “十五”期间国内也开展了飞网技术相关的研究<sup>[5-8]</sup>, 提出了捕获式飞网原理系统方案, 可分别应用于近距离攻击和近距离安全可靠的捕获.

一般的空间飞网系统由载体航天器、飞网发射系统、飞网与其对角的 4 个牵引质量块组成. 本文着重比较研究飞网两种动力学模型的特性. 飞网动力学较为复杂, 融合了柔性绳索动力学、刚体动力学、摩擦与碰撞等<sup>[5]</sup>, 展开过程存在较强的非线性. 本文通过定义不同的单元材料属性建立了柔性与松弛飞网有限元模型, 并在 ABAQUS 上进行了数值

仿真<sup>[9-11]</sup>, 研究了不同工况下飞网抛撒展开性能参数. 推导建立了飞网动力学模型求解算法. 重点讨论了牵引质量块质量、抛射角度、抛射速度和绳索等效阻尼对飞网展开的影响, 对比了两种飞网模型的展开效果.

## 1 空间飞网系统

如图 1 所示, 本文所研究飞网呈  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  正方形, 网目密度  $34 \times 34$ , 牵引质量块系在飞网四角处, 采用图 2 所示折叠样式. 通过飞网发射系统载体航天器赋予牵引质量块以一定的初速度, 实现飞网抛射展开. 运动方程的求解在基于非线性有限元法的 ABAQUS 下实现. ABAQUS 在计算整个模型变形与应力时不需要做任何假设且计算效率很高<sup>[12]</sup>.

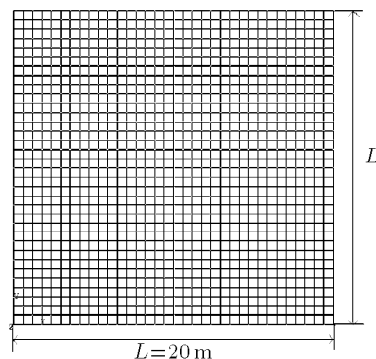
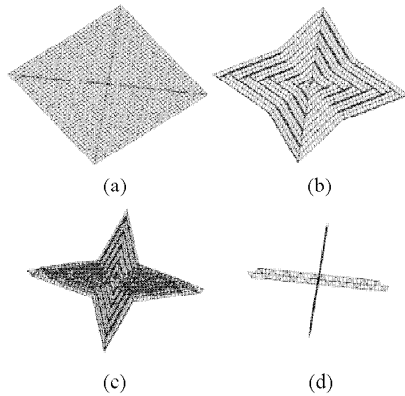


图 1 空间飞网构型

Fig.1 Shape of the space web

2010-06-07 收到第 1 稿, 2011-01-04 收到修改稿.

1) E-mail: lijingyang10@mails.tsinghua.edu.cn

图 2 飞网折叠方式<sup>[13]</sup>Fig.2 Space web folding pattern<sup>[13]</sup>

### 1.1 有限元模型

有限元模型的相邻节点之间采用忽略轴向转动惯量的桁架单元,如图 3 所示.本文在两个节点间只设置一个单元,如果划分更多的单元则会导致出现实际中不存在的面内摆动<sup>[13]</sup>.首先采用 ABAQUS 材料库中的桁架单元构建飞网系统,该单元既能受拉又能受压,应力-应变在弹性极限范围内呈线性关系,该模型称为柔性模型.然后,通过二次开发自定义松弛柔索单元来构建飞网,柔索被建模为两端具有球铰的桁架单元,它只能受拉不能受压,应力-应变关系如图 4 所示,该模型称为松弛模型<sup>[14]</sup>.式(1)中的  $N$ ,  $\Delta$ ,  $EA$  和  $L$  分别代表轴向力、沿轴向伸长量、轴向刚度和柔索单元的初始长度.其中  $N$  与  $\Delta$  的关系可由下式表示

$$\frac{N}{EA} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\Delta}{L} - \varepsilon_0 \right) + \sqrt{\left( \frac{\Delta}{L} - \varepsilon_0 \right)^2 + 4 \left( \frac{T_0}{EA} \right)^2} \right] \quad (1)$$

式中,  $T_0$  和  $\varepsilon_0$  分别代表初始轴向力与初始应变,此时的  $\Delta/L$  等于  $\varepsilon_0$ .图 4 是基于式(1)的应力-应变曲线.图中给出了  $T_0/EA$  的 5 种不同的值,分别是  $4.0 \times 10^{-4}$ ,  $3.0 \times 10^{-4}$ ,  $2.0 \times 10^{-4}$ ,  $1.0 \times 10^{-4}$

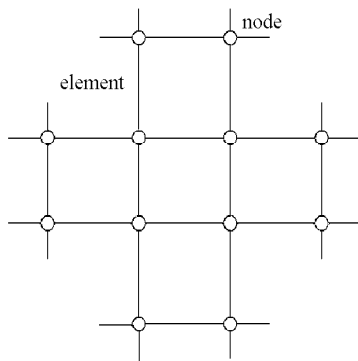


图 3 飞网桁架结构示意图

Fig.3 Truss structure of space web

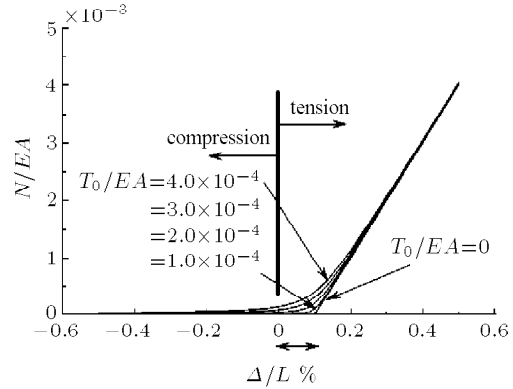


图 4 柔索单元的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain relationship

和 0.当  $T_0 = 0$  时,可知,其对应的是一条双线性应力-应变曲线,轴向刚度在  $\Delta/L = \varepsilon_0$  处并不连续,存在突变.因此,通过给  $T_0$  赋小值来保证迭代平衡分析的稳定性.其中的  $EA$ ,  $\varepsilon_0$  和  $T_0$  可以通过松弛绳索的拉伸试验得到<sup>[14-15]</sup>.最后通过仿真对比上述两种飞网模型展开效果,分析各自展开特点.

### 1.2 动力学模型

本文将基于 ABAQUS/Explicit 显式算法<sup>[9]</sup>,对飞网展开非线性问题进行分析.

#### (1) 节点计算

在初始时间增量步,构建动力学平衡方程

$$M\ddot{u} = P - I \quad (2)$$

式中,  $M$  为节点的质量矩阵,  $\ddot{u}$  为节点的加速度,  $P$  为施加在节点上的外力,  $I$  为单元内应力.在当前增量步开始时 ( $t$  时刻),计算节点加速度

$$\ddot{u}|_{(t)} = (M)^{-1} \cdot (P - I)|_{(t)} \quad (3)$$

使用中心差分法对加速度在时间上进行积分,在时间增量步取得很小的情况下,增量步中的加速度  $\ddot{u}|_{(t)}$  可以看作常数,利用这个速度变化值加上前一个增量步中点的速度  $\dot{u}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})}$  来确定当前增量步中点速度

$$\dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)})}{2} \ddot{u}|_{(t)} \quad (4)$$

通过速度对时间积分加上增量步开始时位移  $u|_{(t)}$ ,确定增量步结束时位移

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (5)$$

## (2) 单元计算

利用当前增量步中点速度确定单元的应变速率

$\dot{\varepsilon}_{el}$

$$\dot{\varepsilon}_{eli}|_{(t+\Delta t)} = \frac{u_{i+1}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} - u_i|_{(t+\frac{\Delta t}{2})}}{l} \quad (6)$$

式中,  $u_i, u_{i+1}$  为连接在单元两侧的节点位移, 如图 5 所示  $i$  为节点编号, 其中  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为飞网总节点数。

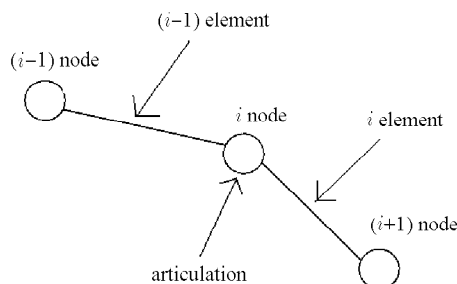


图 5 桁架结构计算示意图

Fig.5 Truss structure calculation illustration

根据应变速率, 确定单元应变增量  $d\varepsilon_{el}$

$$\varepsilon_{eli}|_{(t+\Delta t)} = \varepsilon_{eli}|_{(t)} + d\varepsilon_{eli}|_{(t+\Delta t)} \quad (7)$$

根据材料本构关系计算单元应力  $\sigma_{el}$ , 对于线弹性材料, 应力是弹性模量与应变的乘积

$$\sigma_{eli}|_{(t+\Delta t)} = E_{eli}\varepsilon_{eli}|_{(t+\Delta t)} \quad (8)$$

式中,  $E_{el}$  为材料的当前弹性刚度。对于松弛索索材料, 采用式 (1) 计算单元应力。

根据应变集成节点内力  $I_{(t+\Delta t)}$

$$I_{eli}|_{(t+\Delta t)} = A_{eli}\sigma_{eli}|_{(t+\Delta t)} \quad (9)$$

式中,  $A_{el}$  为单元横截面积。

(3) 设置时间  $t$  为  $t + \Delta t$ , 返回到步骤 (1), 直到  $t$  等于所设定的仿真时间, 计算结束。

### 1.3 捕获飞网性能参数

空间飞网系统通过牵引质量块带动飞网弹出展开, 对非合作目标实施捕获, 然后通过系绳将捕获目标强制回收或离轨。为了衡量飞网的抛射展开效果、在轨捕获能力和最佳捕获距离, 定义捕获飞网性能参数<sup>[16]</sup>:

最大展开面积  $A_{\max}$ : 网口展开面积的最大值。

有效作用距离  $d_1$ : 在载体航天器的随体坐标系中网口展开面积达到未折叠面积 80% 所飞行的距

离<sup>[6,16]</sup>(牵引质量块质心与飞网中心节点连线中点到随体坐标原点的距离)。

有效作用距离区间  $[d_s, d_e]$ : 有效作用距离的起点与终点。

展开到预定位置的面积  $A_d$ : 在预定捕获距离网口展开面积。

展开到预定位置的时间  $t_d$ : 飞行到预定捕获距离所需时间。

有效作用时间区间  $[t_s, t_e]$ : 有效作用距离的时间起点与终点。

展开到最大展开面积的距离  $d_{A\max}$ : 展开到最大展开面积所飞行的距离。

在空间飞网发射过程中, 飞网通过牵引块抛撒展开, 因此牵引质量块质量  $m_s$ 、抛射速度  $v_0$ 、抛射角度  $\theta$  与飞网编织结构所带来的阻尼  $\mu$  是决定飞网发射展开的关键。抛射角度定义为质量块抛射方向与飞网发射方向的夹角, 如图 6 所示,  $y$  为飞网抛射方向,  $\theta$  为抛射角。

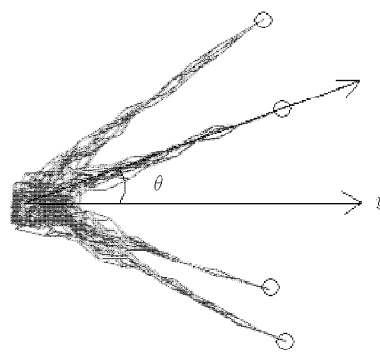


图 6 牵引质量块抛射角度

Fig.6 Projecting velocity direction

结构阻尼  $\mu$  由等效阻尼系数  $\beta$  替代, 产生的阻尼

$$C = \alpha M + \beta K \quad (10)$$

式中,  $M, K$  分别为飞网质量矩阵与刚度矩阵。由于飞网展开过程存在刚体位移, 由此产生与  $M$  成比例的阻尼为外阻尼, 因此在 ABAQUS 中置  $\alpha = 0$ , 通过调整  $\beta$  来仿真飞网的结构阻尼。

## 2 动力学仿真与分析

### 2.1 给定工况下动力学仿真

使用 ABAQUS 建立飞网有限元模型, 并在给定工况下进行数值仿真。图 7 和图 8 所示柔性模型与松弛模型在各自最优工况下展开过程仿真图。松弛

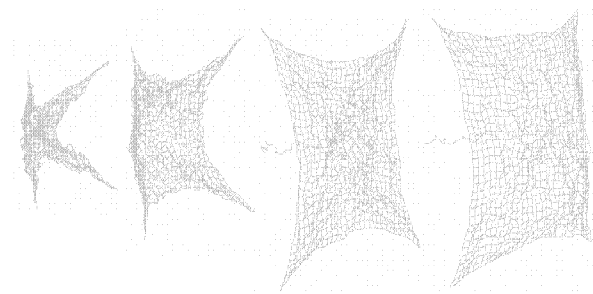


图 7 柔性模型展开过程仿真图

Fig.7 Emulation pictures of elastic web deployment process

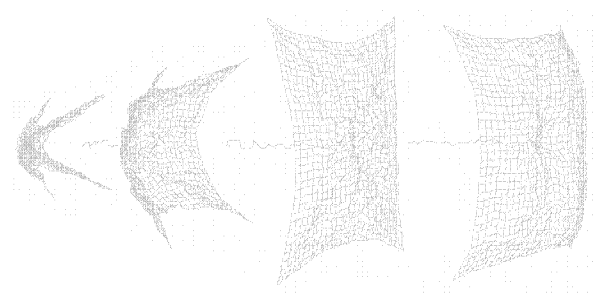


图 8 松弛模型展开过程仿真图

Fig.8 Emulation pictures of flexible web deployment process

模型相比柔性模型, 展开过程更加柔和, 展开效果更逼近真实飞网。

给定载体航天器与飞网之间的连接绳索采用 Kevlar49, 截面形状圆形, 截面积  $2.77 \text{ m}^2$ , 长度  $25 \text{ m}$ . 飞网质量  $m_w = 1.58 \text{ kg}$ , 预定捕获距离  $C = 15 \text{ m}$ , 牵引质量块质量  $m_s = 2 \text{ kg}$ ,  $v_0 = 25 \text{ m/s}$ ,  $\theta = 45^\circ$ , 等效阻尼系数  $\beta = 5 \times 10^{-6}$ , 网结构参数如表 1(对松弛模型弹性模量  $130 \text{ GPa}$  是指材料所能达到的弹性模量最大值), 研究柔性飞网展开面积随展开时间与展开距离的变化. 图 9 显示展开面积开始随时间线性增加, 达到最大后, 由于网绳自身弹性, 牵引质量块出现反弹, 导致网口面积缩小. 在预定捕获距离  $15 \text{ m}$  网口面积达到最大, 并在一定范围内保持较大覆盖, 而后收缩. 所以, 柔性飞网的抛射展开分为 3 阶段: 展开、保持、收缩. 在保持阶段完成对非合作目标的捕获.

表 1 柔性飞网结构参数

Table 1 Structure parameters of space web

| Web size                           | Element number        | Mass              | Mesh density |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|
| $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ | $34 \times 34$        | $1.58 \text{ kg}$ | 2 380        |
| Cross-sectional area               | Density               | Young's modulus   |              |
| $1 \text{ mm}$                     | $1.44 \text{ g/cm}^3$ | $130 \text{ GPa}$ |              |

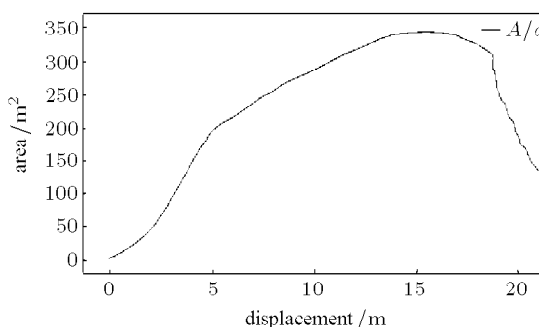
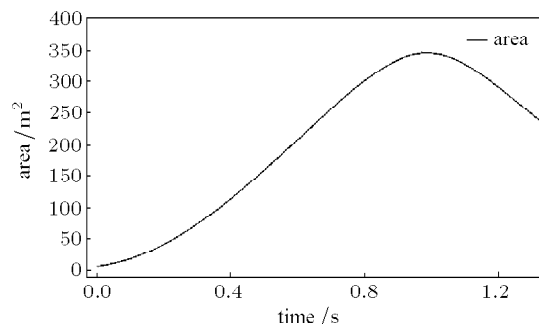


图 9 飞网发射过程展开面积随时间与距离的变化

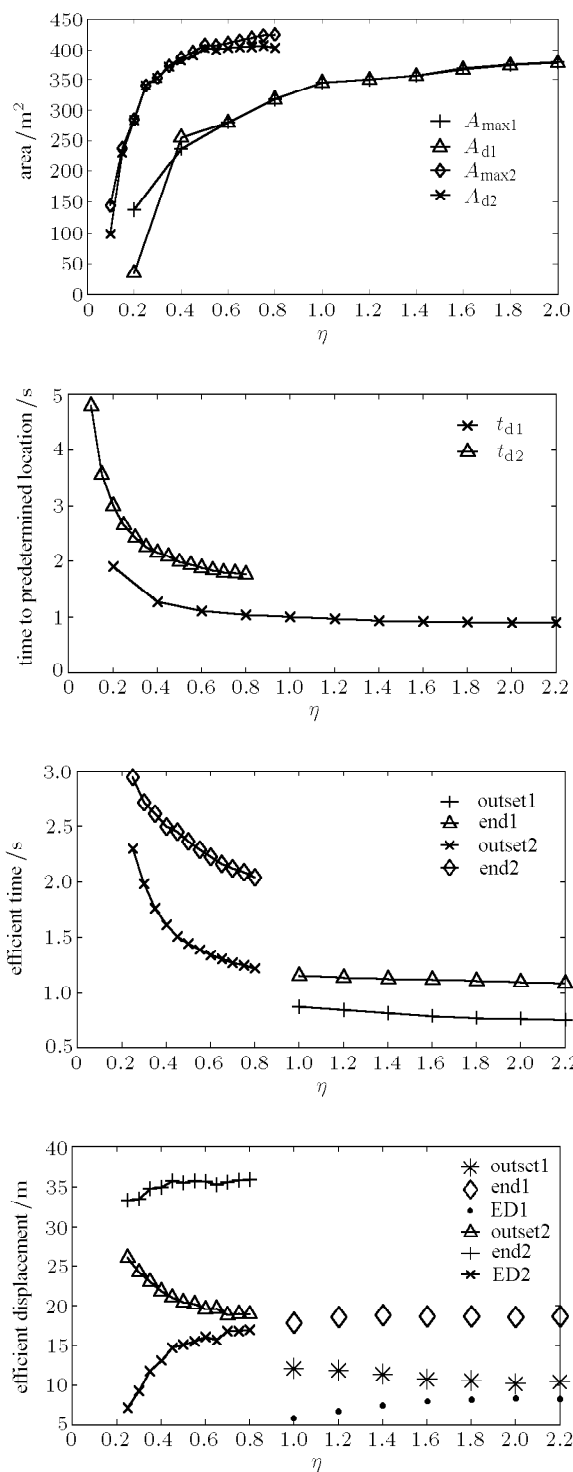
Fig.9 Spread area of space web changes with time and distance

通过仿真表明, 松弛飞网发射过程展开面积随时间与距离的变化规律与柔性飞网相似, 展开过程同样分为 3 个阶段: 展开、保持、收缩. 故不再给出仿真算例.

## 2.2 不同工况下的仿真与特性分析

飞网结构与系绳参数同 2.1 节, 分析牵引质量块质量、抛射角度、抛射速度和绳索等效阻尼对捕获飞网性能参数的影响. 图中: 1 为柔性模型, 2 为松弛模型,  $ED$  为有效作用距离, 开始与结束分别代表飞网有效展开起点与终点. 图 10 显示有连接绳柔性模型与松弛模型抛撒性能参数随质量比  $\eta$  的变化.

柔性模型给定  $v_0 = 25 \text{ m/s}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\beta = 5 \times 10^{-6}$ ,  $C = 15 \text{ m}$ , 质量比  $\eta = m_s/m_w$  在  $0 \sim 2.2$  范围内增加,  $A_d$ ,  $A_{\max}$  增加且基本重合;  $t_d$  先迅速减小后趋于缓和;  $t_s$ ,  $t_e$  减小;  $d_l$  先增后减, 在  $\eta = 2$  时达到最大. 当  $\eta < 1$  飞网不能有效展开 (最大展开面积小于未折叠面积 80%), 因此不存在有效作用时间与有效作用距离. 所以牵引质量块质量越大, 最大展开面积越大, 展开到预定位置面积也越大; 到达预定捕获距离的时间越短; 越有利于飞网的快速展开; 有效作用距离存在最大值. 飞网在预

图 10 质量比  $\eta$  的影响Fig.10 Projecting at different  $\eta$ 

定捕获位置近似展开到最大展开面积, 基本不受质量比的影响。

松弛模型给定  $v_0 = 25 \text{ m/s}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $C = 30 \text{ m}$ , 质量比  $\eta$  在  $0.1 \sim 0.8$  范围内增加,  $A_d$ ,  $A_{\max}$  增加且在  $0.15 \sim 0.55$  范围之内基本重合, 之外逐渐远离;  $t_d$  先迅速减小后趋于缓和;  $t_s$ ,  $t_e$  减小;

$d_s$  减小,  $d_e$  开始增加后呈现波动, 但平均值变化很小; 有效作用距离  $d_l$  呈全局增加, 在  $\eta = 0.65$  处出现局部减小, 这是由于飞网拉伸方向与前进方向速度分量不协调, 导致网体中部严重前凸, 使展开面积过快减小所致; 最大展开面积的发生距离先增后减, 在  $[25 \text{ m}, 30 \text{ m}]$  区间内变化,  $\eta = 0.25$  时达到最大  $d_{A_{\max}} \approx 30 \text{ m}$ . 当  $\eta < 0.25$  飞网不能有效展开, 因此不存在有效作用时间与有效作用距离. 所以牵引质量块质量越大越有利于松弛模型的展开, 到达预定位置时间越短, 有效作用距离也越大;  $\eta$  的最佳取值范围在  $0.15 \sim 0.55$ , 此时在预定捕获位置飞网近似展开到最大面积, 基本不受质量比影响。

图 11 显示无连接绳柔性模型与松弛模型抛撒性能随抛射角度  $\theta$  的变化。

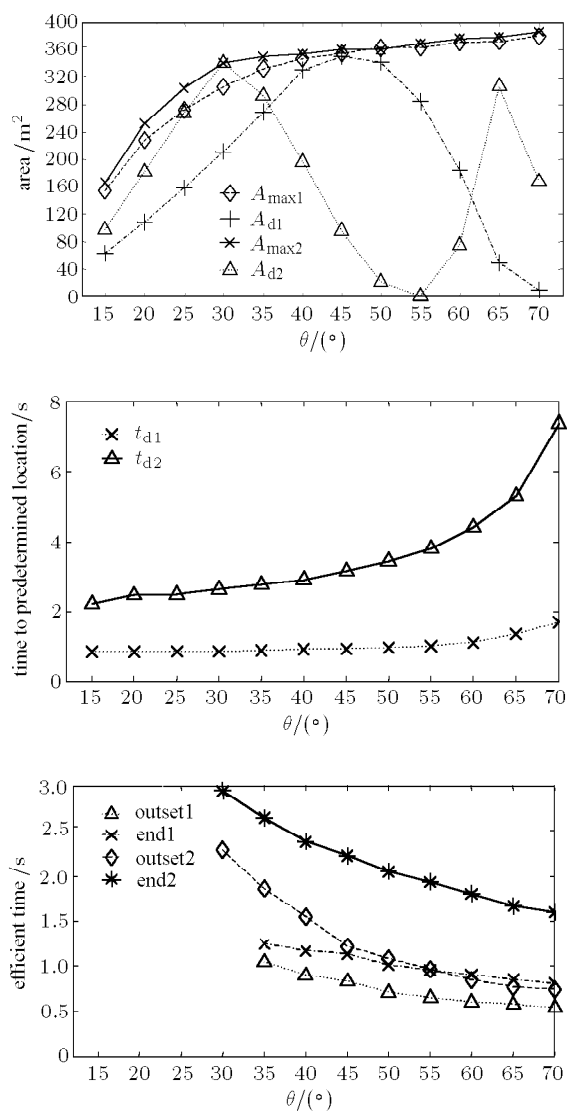


图 11 牵引质量块抛射角度的影响

Fig.11 Projecting at different velocity directions

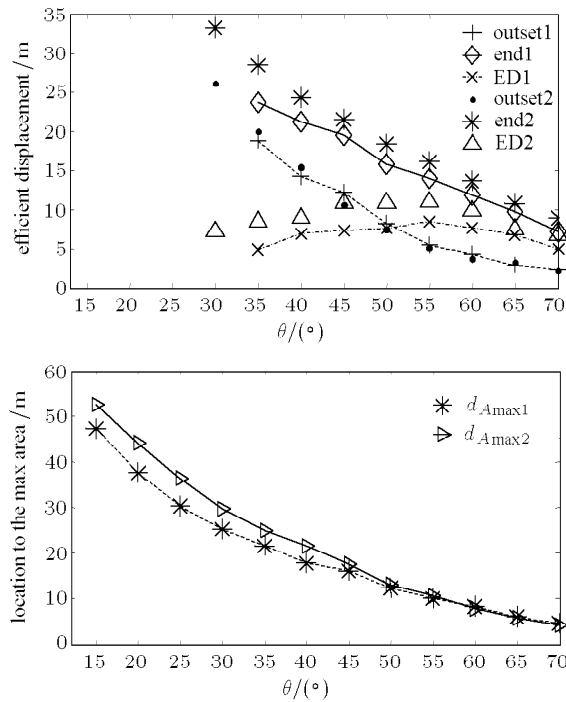


图 11 牵引质量块抛射角度的影响 (续)

Fig.11 Projecting at different velocity directions (continued)

柔性模型给定  $m_s = 2\text{ kg}$ ,  $v_0 = 25\text{ m/s}$ ,  $\beta = 5 \times 10^{-6}$ ,  $C = 15\text{ m}$ , 抛射角度  $\theta$  在  $15^\circ \sim 70^\circ$  范围内增加,  $A_{\max}$  增加,  $A_d$  先增后减在  $\theta = 45^\circ$  时达到最大并与  $A_{\max}$  重合;  $t_d$  先缓慢增加,  $\theta \geq 45^\circ$  后迅速增大;  $t_s, t_e$  不断减小;  $d_s, d_e$  不断减小,  $d_l$  先增后减在  $\theta = 55^\circ$  时达到最大; 展开到最大面积的距离  $d_{A\max}$  不断减小. 当  $\theta < 35^\circ$  飞网未能有效展开, 不存在有效作用距离与有效作用时间. 所以抛射角度增加, 柔性模型的最大展开面积增大,  $\theta = 45^\circ$  时在预定捕获位置飞网展开到最大展开面积; 到达预定捕获位置的时间增加; 因此有利于飞网的展开. 最佳捕获距离减小, 捕获区间先增后减, 在  $\theta = 55^\circ$  捕获容错能力达到最大.

图 12 显示无连接绳柔性模型与松弛模型抛撒性能随抛射速度  $v_0$  的变化.

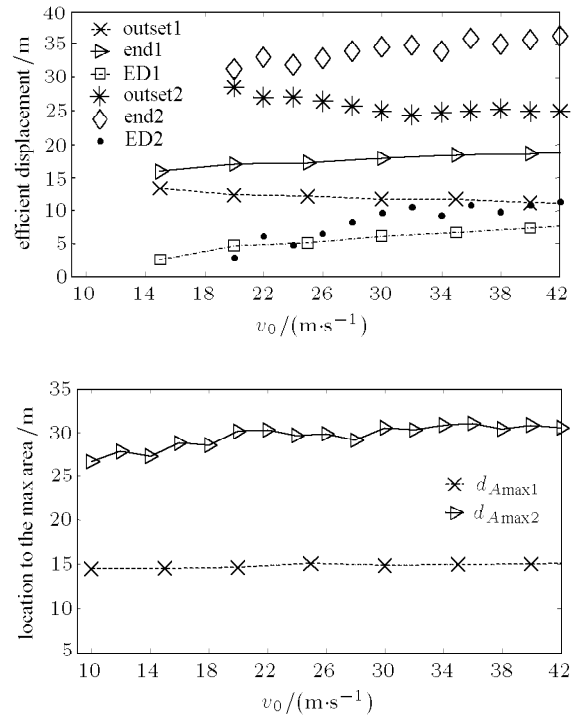
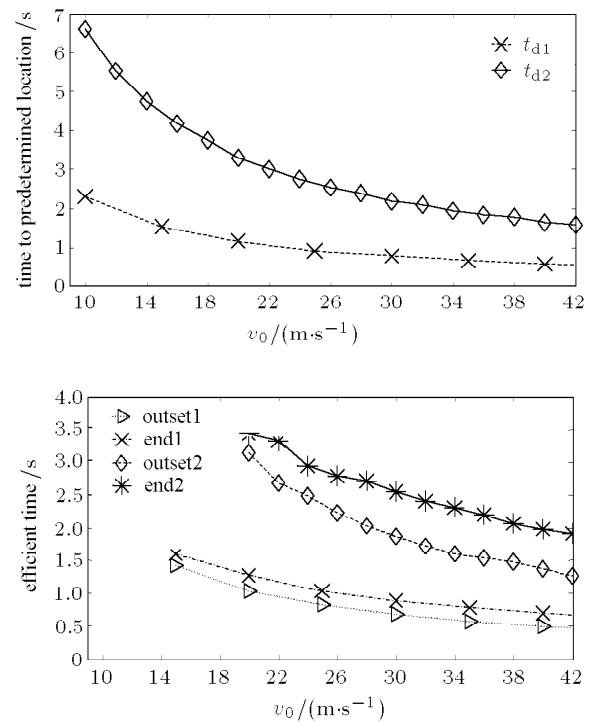
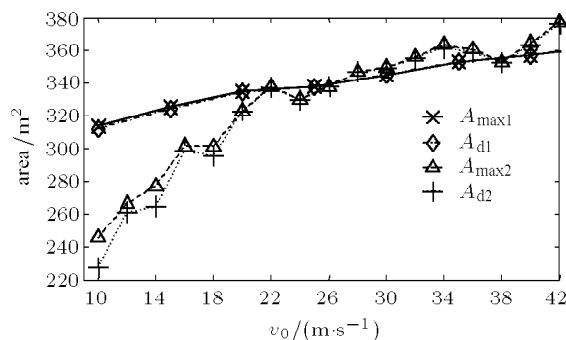


图 12 牵引质量块抛射速度的影响

Fig.12 Projecting at different velocity

松弛模型给定  $v_0 = 25\text{ m/s}$ ,  $\eta = 0.25$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $C = 30\text{ m}$ , 抛射角  $\theta$  在  $15^\circ \sim 70^\circ$  范围内增加,  $A_{\max}$  增加,  $A_d$  先增后减,  $\theta = 30^\circ$  时两者重合  $A_d$  达最大;  $t_s, t_e$  减小;  $t_d$  增加;  $d_s, d_e$  减小, 有效作用距离  $d_l$  先增后减, 这是由后期前进方向速度分量严重减小所致;  $d_{A\max}$  减小. 当  $\theta < 30^\circ$  飞网不能有效

展开,不存在有效作用距离与有效作用时间.所以抛射角度增大,最大展开面积增大、展开速度增快、展开到预定位置时间增加,因此有利于飞网的展开.但最佳捕获距离减小,并且有效作用距离随抛射角度变化存在最大值.仅当  $\theta = 30^\circ$ ,飞网在预定捕获距离展到最大面积.

柔性模型给定  $m_s = 2\text{ kg}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\beta = 5 \times 10^{-6}$ ,  $C = 15\text{ m}$ , 抛射速度  $v_0$  在  $10 \sim 42\text{ m/s}$  范围内增加,  $A_{\max}$ ,  $A_d$  增加且随  $v_0$  变化基本重合;  $t_d$  减小;  $t_s$ ,  $t_e$  减小;  $d_s$  减小,  $d_e$  增加,因此有效作用距离  $d_l$  增大;  $d_{A\max}$  维持在  $15\text{ m}$  左右.当  $v_0 < 15\text{ m/s}$  飞网不能有效展开,不存在有效作用距离与有效作用时间.所以,抛射速度越大,飞网的最大展开面积越大;展开到预定位置的时间越短;越有利于飞网的快速展开;有效作用距离越大,具有越好的捕获容错能力.飞网在预定捕获位置近似展开到最大展开面积,不受抛射速度的影响.

松弛模型给定  $\theta = 30^\circ$ ,  $\eta = 0.25$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $C = 30\text{ m}$ , 抛射速度  $v_0$  在  $10 \sim 42\text{ m/s}$  范围内增加,  $A_{\max}$ ,  $A_d$  波动上升且基本重合;  $t_d$  减小;  $t_s$ ,  $t_e$  减小;  $d_s$  先减小,  $v_0 > 30\text{ m/s}$  后基本保持不变,  $d_e$  波动上升;  $d_l$  总体增加但存在局部波动;  $d_{A\max}$  开始增加后维持在  $30\text{ m}$  左右,同样存在着强烈的波动.当  $v_0 < 20\text{ m/s}$  飞网不能有效展开,不存在有效作用距离与有效作用时间.所以,由于网绳材料非线性松弛模型抛撒性能参数随速度变化存在较强波动.但总体上抛射速度的增大,有利于飞网的展开,到达预定位置的时间减小;有效作用距离虽存在波动但总体增加,在  $22\text{ m/s}$  时存在局部最大值;最大展开面积的发生距离在  $v_0 > 20\text{ m/s}$  后基本维持在预定捕获距离  $30\text{ m}$ ,基本不受抛射速度影响.

图 13 显示无连接绳柔性模型抛撒性能参数随等效阻尼系数  $\beta$  的变化.给定  $m_s = 2\text{ kg}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ,  $v_0 = 25\text{ m/s}$ ,  $C = 15\text{ m}$ , 等效阻尼系数  $\beta$  在  $0 \sim 2 \times 10^{-3}$  范围内增加,  $A_{\max}$ ,  $A_d$  减小并且存在波动,在  $\beta = 1 \times 10^{-4}$  时,取到最小值,  $A_{\max}$ ,  $A_d$  基本重合不随  $\beta$  变化;  $t_d$  存在波动,但平均值基本保持不变;  $t_s$  增加,  $t_e$  减小;  $d_s$  增加,  $d_e$  减小,因此有效作用距离减小,但随  $\beta$  变化存在局部波动;所以  $\beta$  增加,最大展开面积减小,展开速度减缓,有效作用距离减小.飞网展开到预定捕获位置的面积始终近似于最大展开面积,不受  $\beta$  影响,并且到达预定捕获位置的时间也不随  $\beta$  变化.

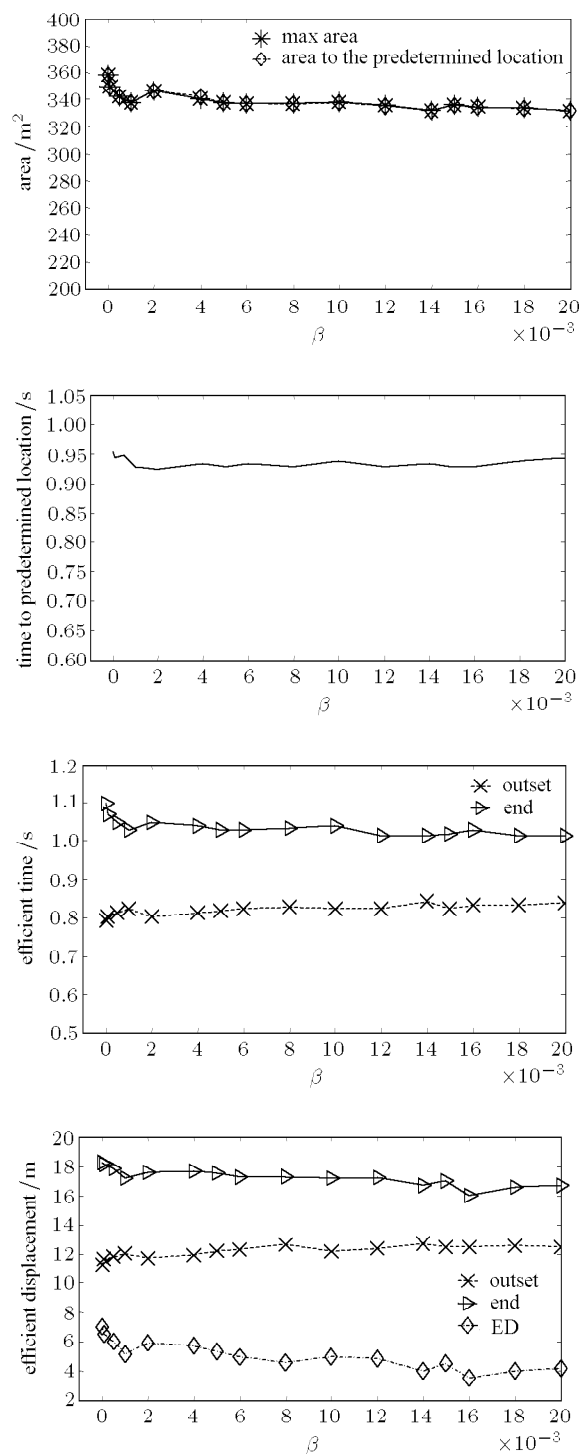


图 13 绳索等效阻尼的影响

Fig.13 Projecting at different damping coefficients

综上,对于柔性模型:

(1) 牵引质量块质量、抛射角度、抛射速度越大,飞网最大展开面积越大,越有利于飞网的快速展开;有效作用距离随质量比与抛射角度的变化先增后减,存在最大值,随抛射速度的增加而增大.牵引质量块质量、抛射速度增加、抛射角度减小有利

于飞网快速展开到预定位置. 结构阻尼的增大不利于飞网的展开, 有效作用距离也随之减小, 但并不会对到达预定位置时间造成影响.

(2) 最大展开面积的发生距离主要受抛射角  $\theta$  制约, 基本不受其余参数影响. 在给定捕获距离 15 m 时, 存在最优抛射角  $45^\circ$  使飞网在预定捕获位置展开到最大展开面积.

### 2.3 柔性模型与松弛模型抛撒性能参数对比

(1) 质量比  $\eta$  越大, 两种飞网的最大展开面积与展开到预定位置的面积越大, 展开到预定位置的时间越短, 展开速度越快, 有效作用距离先增后减. 牵引质量块动量相同时, 松弛模型展开面积与有效作用距离要显著大于柔性模型, 但展开到预定位置的时间较长, 展开速度较慢.

(2) 随抛射角度  $\theta$  增加, 柔性模型与松弛模型抛撒性能参数具有相同的变化规律, 并且在相同  $\theta$  值下, 两种飞网最大展开面积的发生距离比较接近, 基本不受其余抛撒参数影响. 但松弛模型更易展开, 有效作用距离显著大于柔性模型.

(3) 随抛射速度  $v_0$  增加, 柔性模型与松弛模型抛撒性能参数具有相同的变化规律, 但松弛模型抛撒性能参数随  $v_0$  变化存在较大波动, 有效作用距离的增长幅度要显著大于柔性模型.

因此, 松弛模型的展开面积与捕获容错能力要明显优于柔性模型, 可以适应更加恶劣的抛射参数条件. 但展开速度较慢, 展开到预定位置的时间相对较长.

## 3 结 论

(1) 松弛模型相比柔性模型, 展开过程更加柔和, 展开效果更逼近于真实飞网, 但在不同抛射速度下, 松弛模型抛撒性能参数存在较强非线性.

(2) 飞网展开面积、展开速度、有效作用距离与展开到预定位置的时间主要由牵引质量块质量和抛射速度决定. 飞网展开到预定位置的面积主要由抛射角度制约, 基本不受其他参数调节. 牵引质量块质量与抛射速度的增加均有利于飞网的展开, 使飞网具有更大的展开面积与展开速度, 能更快到达预定捕获位置; 由于飞网拉伸与前进方向速度耦合与材料非线性, 有效作用距离先增后减存在最大值. 因此飞网的抛撒参数存在最优解.

(3) 结构阻尼的减小有利于飞网的展开, 可提高飞网的捕获容错能力, 但不影响展开到预定位置的

时间. 飞网抛撒性能参数随阻尼的变化存在较小波动.

## 参 考 文 献

- 1 Cepollina FJ, Mcguire J. Viewpoint: building a national capability for On-Orbit Servicing. ASK Magazine, 2009. 43-45
- 2 [http://www.esa.int/TEC/Robotics/SEMTWLKKKSE\\_0.html](http://www.esa.int/TEC/Robotics/SEMTWLKKKSE_0.html). 2001
- 3 Huntsville. Momentum-Exchange Electrodynamic Reboost (MXER) Tether. [http://ims.ivv.nasa.gov/centers/marshall/pdf/115871main\\_MXER\\_TS.pdf](http://ims.ivv.nasa.gov/centers/marshall/pdf/115871main_MXER_TS.pdf). 2007
- 4 <http://search.nasa.gov/search/search.jsp?nasaInclude=mxer>. 2007
- 5 陈钦, 杨乐平. 空间飞网系统发射动力学问题研究. 宇航学报, 2009, 30(5): 1829-1833(Chen Qin, Yang Leping. Research on casting dynamics of orbital net systems. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(5): 1829-1833(in Chinese))
- 6 于洋, 宝音贺西, 李俊峰. 空间飞网抛射展开过程动力学建模与仿真. 宇航学报, 2010, 31(5): 1289-1296(Yu Yang, BaoYin Hexi, Li Junfeng. Modeling and simulation of space web projecting dynamics. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1289-1296(in Chinese))
- 7 翟光, 仇越, 梁斌等. 空间飞网捕获机器人系统时变惯量姿态动力学研究. 宇航学报, 2008, 29(4): 1131-1136(Zhai Guang, Qiu Yue, Liang Bin, et al. Research of attitude dynamics with time-varying inertia for space net captures robot system. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1131-1136(in Chinese))
- 8 赵国伟, 熊会宾, 黄海等. 柔性绳索体展开过程数值模拟及实验. 航空学报, 2009, 30(8): 52-57(Zhao Guowei, Xiong Huibin, Huang Hai, et al. Simulation and experiment on deployment process of flexible rope. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(8): 52-57(in Chinese))
- 9 庄茁, 由小川, 廖剑晖等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用. 北京: 清华大学出版社, 2009(Zhuang Zhuo, You Xiaochuan, Liao Jianhui, et al. Based on ABAQUS Finite Element Analysis and Application. Beijing: Tsinghua University Press, 2009(in Chinese))
- 10 Li Qing, Ma Xingrui. A note on the foreshortening effect of a flexible beam. *Multibody Syst Dyn*, 2009, 23(2): 209-225
- 11 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答. 北京: 机械工业出版社, 2009(Cao Jinfeng, Shi Yiping. FAQ ABAQUS Finite Element Analysis. Beijing: China Mechanical Press, 2009(in Chinese))
- 12 Romero I. A comparison of finite elements for nonlinear beams: the absolute nodal coordinate and geometrically exact formulations. *Multibody Syst Dyn*, 2008, 20(1): 51-68
- 13 Gärdback M, Tibert G. Deployment control of spinning space webs. *Journal of Guidance. Control and Dynamics*, 2009, 32(1): 40-50
- 14 Fujiwara J, Segawa S, Kenshi ODA, et al. Static loading texts and a computational model of a flexible net. In: Architectural Institute of Japan. 2007. 66-72

- 15 Fujii F, Noguchi H, Osterrieder P. Static and dynamic large displacement response of flexible nets. IASS-APCS, Taipei. 2003
- 16 李京阳. 空间飞网动力学. [学士论文]. 南京: 南京航空航天大学

学, 2010(Li Jingyang. Dynamics of space webs. [Bachelor Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010(in Chinese))

(责任编辑: 周冬冬)

## SIMULATION AND COMPARISON OF DIFFERENT DYNAMICAL MODELS OF SPACE WEBS

Li Jingyang<sup>1)</sup> Yu Yang BaoYin Hexi Li Junfeng

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Space webs which have great potential applications in orbit Service, recovery of spacecraft, orbit cleaning, space interceptor, woven from lightweight and pliable rope, are webs of unstable configuration formed by throwing and spreading. This paper adopts the finite element software ABAQUS in order to model the system of elastic webs and the system of flexible webs, compares the projecting of two finite element models, proposes metrics on the deployable of webs' system and focuses on traction mass, projectile point, projectile velocity of webs and equivalent damping effect of ropes on webs' deployable under a variety of different conditions. The results of simulation indicate that the unfolding effect of flexible webs is better than that of the elastic webs; traction mass, projectile velocity of webs and equivalent damping effect of ropes are the key factors in effectively webs' unfolding, and projectile point is the main factor to decide the unfolding area to the predetermined location.

**Key words** space webs, non-linear FEA, flexible webs, numerical simulation

---

Received 7 June 2010, revised 4 January 2011.

1) E-mail: lijingyang10@mails.tsinghua.edu.cn