

空间飞网系统牵拉模式影响研究*

高庆玉,张青斌,唐乾刚,丰志伟

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对空间飞网系统任务设计需求,研究飞网牵拉模式对系统展开性能的影响。建立空间飞网系统牵拉出展过程动力学模型,并通过地面试验对比验证了模型的有效性。面向任务需求建立空间飞网系统评价指标,针对四、六点牵拉模式,采用有限绳段方法对飞网系统进行建模仿真。模型中保持绳网质量和初始发射能量一致,对评价指标的分析结果表明,在六点牵拉模式下,飞网系统飞行性能指标和力学性能指标有明显提高,但能量利用率和系统可靠性小幅下降。

关键词:太空垃圾;空间飞网;牵拉模式;动力学建模;评价指标

中图分类号: V414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)02-042-07

Research on the drag mode of space net system

GAO Qingyu, ZHANG Qingbin, TANG Qiangang, FENG Zhiwei

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the problem in the mission design demands, the influence of the drag mode on the deployment property of the space net system was investigated. The dynamic model was set up and verified by ground test result. Evaluation criterion of space net system was set up to meet the mission demands and the impact that the drag mode brought in was studied through a finite element method. The simulation models, in which mass of the net and initial projection energy were kept the same, were built based on the finite segment approach for four and six points drag modes. Simulation result of the evaluation criterion indicates that the system flight performance indexes and the dynamic evaluation criterions are improved in the six points drag mode, the energy utilization rate and system reliability, however, show minor decrease.

Key words: space debris; space net; drag mode; dynamic modeling; evaluation criterion

伴随航天事业的发展,太空环境安全问题已经成为人们关注的焦点,太空垃圾对太空环境安全造成的威胁日益凸显。太空垃圾,主要是指由于人造航天器爆破、碰撞以及导弹试验等产生的无用碎片,这些太空垃圾往往是非合作的,具有非常复杂的未知力学特性。有效的太空垃圾清除系统必须能够应对不同尺寸、材料及构型的太空垃圾。

近年来,国内外科研工作者针对太空垃圾清除开展了大量积极的研究探索工作。多项太空垃圾清除概念应运而生,由于太空垃圾的非合作特性,空间飞网捕获系统成为一种具有应用潜力的太空垃圾清除装置^[1]。

空间飞网是在安全距离之外使用绳网对目标垃圾实施抓捕的太空垃圾清除概念。空间飞网系统工作过程中,飞网捕获平台向被捕获目标方向发射展开一张由细绳编织成的网,通过飞网包裹住目标航天器,利用飞网收口机构收拢网口并形

成死锁,防止目标脱离飞网捕获系统。

飞网捕获系统的核心部分就是由柔性绳索编织而成的飞网,飞网的主要功能是包裹和容纳目标航天器,在设计过程中既要考虑绳索参数和飞网的结构形状,又要满足空间任务的要求,同时也希望飞网的质量小、强度大、结构稳定且不容易发生缠绕。

目前欧空局^[2-6]、美国^[7]、英国^[8-10]、日本^[11-12]以及国内的一些研究机构正在积极开展相关方面的研究,虽然关于空间飞网的公开资料十分有限,但是可知某些相关支撑技术已经取得了突破性进展。值得一提的是,在过去的十年里,欧空局(European Space Agency, ESA)一直致力于柔性清除系统的研发,近期 ESA 已着手将飞网捕获概念研究转为试验研究。国内诸多研究机构的多位学者在空间飞网的研究领域做出了大量的研究工作,对发射参数对于空间飞网的展开性能影

* 收稿日期: 2016-02-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272345)

作者简介:高庆玉(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,E-mail:gao.qing.yu@163.com;

张青斌(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:qingbinzhang@sina.com

响进行了初步研究^[3]、提出了面向空间任务的发射参数优化设计^[13-14],并进行了飞网的天地差异性分析^[15]。

本文所提及的牵拉模式是指绳网依靠质量块惯性从网舱中牵拉而出时,牵拉点数即质量块的数目。以往对空间飞网的研究多经验式地采用四点牵拉模式^[16-19],即由四个质量块牵拉绳网从网舱中拉出、展开,并未对其他牵拉模式进行深入讨论。文献[17, 20]中定义了网口展开时间、最大展开面积、有效作用时间、有效作用距离等一系列飞网展开性能指标,并以这些指标作为衡量标准进行了飞网发射参数对展开性能的影响分析。上述指标还局限于对飞网展开的飞行性能描述,不能对空间飞网展开性能进行全面深入的评价。

本文从空间飞网设计任务要求入手,构建飞网设计评价指标,深入分析飞网的发射展开性能,重点研究四、六点牵拉模式对空间飞网展开性能的影响。

1 系统描述

空间飞网发射展开装置一般由绳网、网舱、发射器、质量块等主要部分组成,如图1所示。

空间飞网系统的工作过程如下:发射准备前,绳网折叠收纳于网舱内,绳网顶点分别与质量块相连接;发射器点火后,推动质量块按照设计发射速度 v_0 、发射张角 α 运动(发射张角 α 定义为质量块速度方向与网舱轴线间的夹角,见图1)。在质量块的牵拉下,绳网逐步依次拉出网舱,并展开达到张满状态。

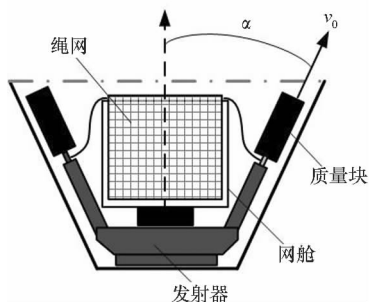


图1 空间飞网发射装置

Fig.1 Space net projection system

2 飞网评价指标

理想的飞网抛射过程中,飞网应当在较短时间内展开到充分大的面积,并保持较大的拦截面积飞行较长时间和较远距离,以满足时间和空间上的容错性要求。为了对飞网发射展开时的尺寸、形状和展开过程进行定量的描述,构建由飞网

设计指标、飞网性能指标以及飞网强度指标构成的飞网评价指标。

2.1 设计指标

为了在不同构型飞网之间建立统一的衡量标准,提出飞网的设计指标,包括设计直径和设计面积。

具体描述如下:

- 1) 设计直径: D_d 飞网处于平铺状态时,外接圆直径的大小。
- 2) 设计面积: S_d 飞网处于平铺状态时的自然展开面积。

2.2 飞行性能指标

为了对飞网展开过程进行定量描述并有效评价飞网展开性能,定义了投影内径、投影外径、有效投影面积、展开度、有效作用时间、有效作用距离等性能指标。具体描述如下:

- 1) 投影内径 D_{in} :飞网投影面积内接圆直径的大小,是飞网展开的下限直径,见图2。
- 2) 投影外径 D_{out} :飞网投影面积外接圆直径的大小,是飞网展开的上限直径,见图2。
- 3) 有效投影面积 S_p :飞网网口在发射方向的投影面积,描述了飞网的实际覆盖范围,决定了飞网可捕获目标的尺寸。

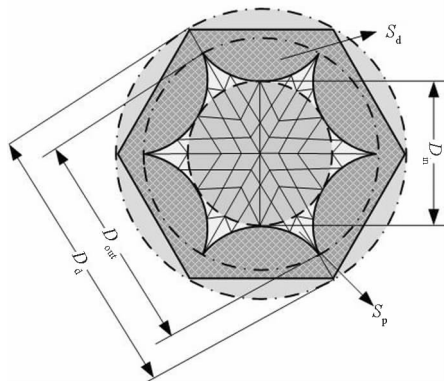


图2 飞网系统性能评价指标

Fig.2 Evaluation criterion of space net system

- 4) 展开度系数 C_s :飞网发射展开过程中有效投影面积与飞网设计面积之比,代表了飞网展开的程度。

$$C_s = \frac{S_p}{S_d} \quad (1)$$

C_s 越接近1,飞网的形状越接近于飞网设计的形状,有效投影面积越接近于设计面积,这说明飞网展开得越充分,展开效果越好。

- 5) 有效作用时间 T_e :指飞网有效投影面积上升至最大后第一次回弹至理论面积的80%时(即

展开度 $\eta = 0.8$) 飞网所飞过的时间, 它代表了飞网对目标实施抓捕的时间尺度范围。

6) 有效作用距离 R_e : 是指飞网在有效作用时间内所飞过的距离, 代表了飞网对目标实施抓捕的空间尺度范围。飞网飞行距离可表示为:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2)$$

其中, n 代表质量块的个数, r_i 代表每个质量块的距离在发射方向上的投影。

2.3 力学性能指标

飞网的力学性能指标用来衡量飞网抛射过程中绳索的内力及其变化, 从能量的角度对飞网展开性能进行的评价, 包括最大内力、内力均值、内力方差和内力变异系数以及能量衰减系数。具体描述如下:

1) 最大内力 F_{\max} : 飞网绳索中的最大内力直接反映飞网强度。

2) 内力均值 F_{ave} : 绳段中内力的总和与绳段数量的比值, 代表了飞网中的内力平均大小。

3) 内力变异系数 C_f : 内力方差与内力均值的比值, 是飞网中各绳段的内力不均匀度归一化的结果, 代表了飞网中各绳段内力分布的不均匀情况, 一定程度上反映了绳索的抗缠绕性能。可以用于不同类型绳网内力分布的比较。

4) 能量衰减系数 C_e : 系统机械能的衰减量与发射初始状态系统机械能总和的比值, 用来衡量系统的能量耗散情况。

3 动力学模型

由于空间绳网发射前需折叠收纳于网舱之中, 不可避免地会引入拉出过程中绳网与绳网、绳网与网舱之间的摩擦问题。目前对于此类问题尚无准确建模的方法, 通过大量地面试验发现, 在绳网松弛收纳的情况下, 出舱摩擦力对绳网展开过程的影响差异性并不显著。因此在绳网松弛收纳的基础上, 本文的建模过程忽略了绳网出舱过程中的摩擦问题。

3.1 网格离散

如图 3 所示, 对于空间飞网的展开过程采用离散化的建模思路, 将绳索单元处理为质量阻尼弹簧单元, 绳网则简化为通过绳索单元连接的多体系统动力学模型。在建模过程中, 首先计算各单元张力, 再计算各单元所受的外力; 然后将其等效到关联节点上; 最后联立各节点动力学方程, 得到飞网系统的动力学方程。

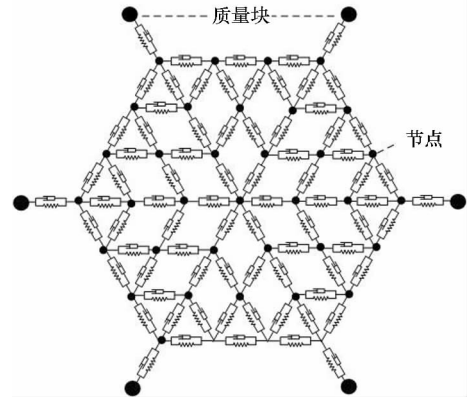


图 3 柔性绳网多体系统示意图

Fig. 3 Multi-body system model of flexible net

3.2 动力学方程

已拉出绳段节点的运动由相应绳段上的绳索张力、气动阻力和重力来决定。

绳段单元 s_{ij} 的绳索张力 T_{ij} 近似为线弹性与线性阻尼之和, 可表示为:

$$T_{ij} = \begin{cases} k_{ij}\varepsilon_{ij} + c_{ij}\dot{l}_{ij} & l_{ij} > l_{ij}^0 \\ 0 & l_{ij} \leq l_{ij}^0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, l_{ij}^0 为 s_{ij} 绳段的自然长度; $\varepsilon_{ij} = l_{ij} - l_{ij}^0$ 为绳段的长度变化量; \dot{l}_{ij} 为绳段的长度变化率; k_{ij} 和 c_{ij} 分别代表绳段的等效弹性系数和等效阻尼系数。

如图 4 所示, 在惯性系下节点 i, j 的位置矢量分别为 $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$, 则绳段 s_{ij} 的实际长度 l_{ij} 及其变化率 \dot{l}_{ij} 可表示为:

$$\begin{cases} l_{ij} = \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\| \\ \dot{l}_{ij} = (\dot{\mathbf{r}}_j - \dot{\mathbf{r}}_i) \cdot \mathbf{e}_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中, \mathbf{e}_{ij} 为由节点 i 指向节点 j 的单位矢量, 即

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\|} \quad (5)$$

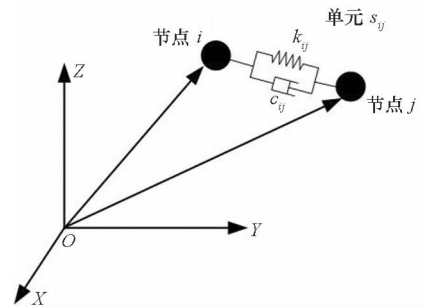


图 4 绳段单元半弹簧-阻尼模型

Fig. 4 Semi-spring damper model of tether segment

绳段 s_{ij} 的等效弹性系数为:

$$k_{ij} = EA_{ij}/l_{ij}^0 \quad (6)$$

式中, E 为杨氏模量, 由材料属性决定, A_{ij} 为绳段 s_{ij} 的横截面积。

绳段 s_{ij} 的等效阻尼系数 c_{ij} 为:

$$c_{ij} = 2\zeta \sqrt{m_{ij}k_{ij}} = 2\zeta \sqrt{\rho_{ij}EA_{ij}} \quad (7)$$

式中, m_{ij} 为绳段 s_{ij} 的质量, ζ 为绳索阻尼比, 该参数取决于绳索的材料和编织方式。

作用于绳段的外力主要包括重力和气动力, 气动力可以分解为气动阻力和气动升力。作用于绳段 s_{ij} 的外力 F_{ij}^{ex} 为:

$$F_{ij}^{ex} = G_{ij} + F_{ij}^D + F_{ij}^L \quad (8)$$

设地面重力加速度大小为 g , 方向竖直向下, 则重力 G_{ij} 可表示为:

$$G_{ij} = \rho_{ij}l_{ij}^0g \quad (9)$$

气动阻力 F_{ij}^D 和气动升力 F_{ij}^L 可表示为:

$$\begin{cases} F_{ij}^D = \frac{1}{2}\rho_{air}C_{ij}^Dd_{ij}l_{ij}^0\|v_{ij}^r\|^2e_{ij}^D \\ F_{ij}^L = \frac{1}{2}\rho_{air}C_{ij}^Ld_{ij}l_{ij}^0\|v_{ij}^r\|^2e_{ij}^L \end{cases} \quad (10)$$

式中, ρ_{air} 为大气密度, d_{ij} 为绳段的直径, v_{ij}^r 为绳段相对于风的速度, 设地面风速为 v_{wind} , 则

$$v_{ij}^r = \frac{1}{2}(v_i + v_j) - v_{wind} \quad (11)$$

式中, e_{ij}^D 为气动阻力方向单位矢量, 与 v_{ij}^r 方向相反, e_{ij}^L 为气动升力方向单位矢量, 有

$$e_{ij}^L = \frac{-(v_{ij}^r \times e_{ij}) \times u_{ij}^r}{\|(v_{ij}^r \times e_{ij}) \times u_{ij}^r\|} \quad (12)$$

式中, C_{ij}^D, C_{ij}^L 分别为绳段的阻力系数和升力系数, 采用 Paul Williams 的工程经验公式近似计算:

$$\begin{cases} C_{ij}^D \approx 0.022 + 1.1 \sin^3 \alpha_{ij} \\ C_{ij}^L \approx 1.1 \sin^2 \alpha_{ij} \cos \alpha_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

式中 α_{ij} 为 s_{ij} 的攻角。

定义 $conn\{i\}$ 为共用节点 i 的所有单元的集合, 在惯性坐标系下已拉出绳段节点 i 的动力学方程可以表示为:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{r}_i &= T_i + F_i^{ex} \\ &= \sum_{j \in conn\{i\}} T_{ij} + \sum_{j \in conn\{i\}} \frac{1}{2} F_{ij}^{ex} \end{aligned} \quad (14)$$

4 模型验证

在地面条件下, 进行飞网抛射试验, 采取垂直向下发射方式。绳网采用边长为 28 m 的正六边形菱形网(绳网构型见图 3), 设计面积为 2077.8 m², 网目边长为 0.4 m。

绳网材料选取如表 1 所示。绳网质量为 3.6 kg, 质量块质量均为 1.5 kg。质量块的发射速度为 25 m/s, 发射张角为 55°。

表 1 绳网材料

Tab. 1 Material of space net

编号	种类	材料名称	直径/mm
1	外廓边线	kavlar49 芳纶绳	3
2	十字加强线	kavlar49 芳纶绳	3
3	内部网线	PE 大力马	0.8

图 5、图 6 分别为绳网发射过程中绳网对角质量块的水平距离(投影外径 D_{out})和质量块的下落距离(飞行距离 R), 可以看出模型仿真结果和试验结果具有很好的一致性。图 7 所示为绳网发射过程中的位形图。

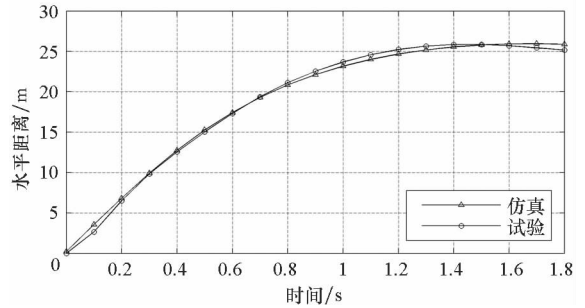


图 5 对角质量块水平距离

Fig. 5 Diagonal distance between diagonal masses

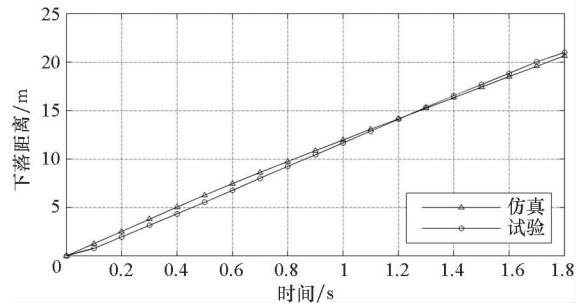
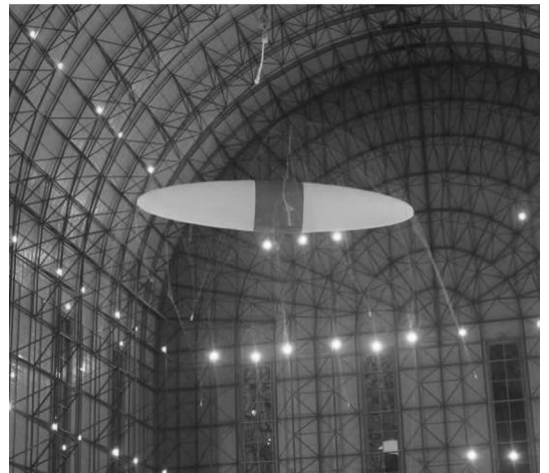


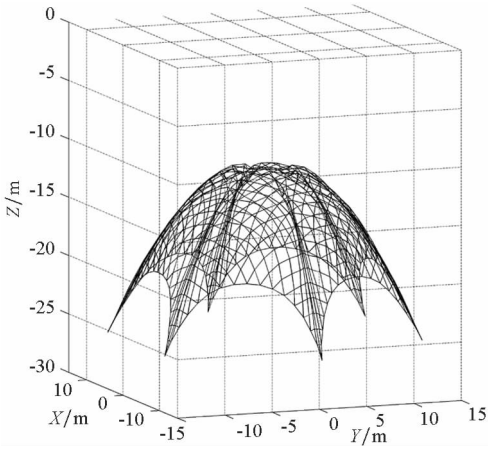
图 6 质量块下落距离

Fig. 6 Flight distance of the masses



(a) 试验

(a) Test



(b) 仿真
(b) Simulation

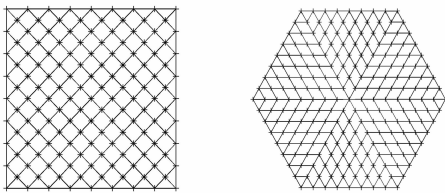
图 7 绳网地面抛射试验位形图

Fig. 7 Shape of space net in ground test

5 仿真算例

在太空工作环境下,忽略重力和空气阻力的影响。采取垂直向下发射方式,分别建立四点、六点牵拉模式下的空间飞网系统仿真模型。仿真模型中的绳网质量、质量块发射角度、速度以及系统初始能量相同。

不同牵拉模式下的飞网构型示意图如图 8 所示,绳网为正多边形平面菱形网(即网格为菱形网目),边长数等于牵拉点数,绳网设计尺寸见表 2,网目边长为 0.4 m。



(a) 四边形 (a) Quadrilateral
(b) 六边形 (b) Hexagon

图 8 不同牵拉模式下的绳网构型示意图

Fig. 8 Configurations of net in different drug modes

表 2 绳网尺寸参数

Tab. 2 Dimension parameters of space net

牵拉模式	设计直径/m	设计面积/m ²
四点	56.0	1599.5
六点	56.0	2077.8

绳索材料选取为 kavlar49(密度 1.44 g/cm³,弹性模量 $E = 200$ GPa);系统质量块发射速度 $v_0 = 15$ m/s,发射角度 $\alpha = 25^\circ$;绳网系统的质量

分布见表 3,为保证不同牵拉模式下系统具有相同的初始发射动能,质量块质量取值如表 3 所示。

表 3 飞网系统质量参数

Tab. 3 Mass of the space net system

牵拉模式	绳网质量/kg	质量块质量/kg
四点	2.0	1.5
六点	2.0	1.0

对比空间飞网系统四点和六点牵拉模式的仿真结果数据,分析如下:

1)根据飞网系统飞行性能指标分析可以看出,飞网系统的投影面积及投影外径均能达到设计尺寸即 $S_p = S_d, D_{out} = D_d$ (见图 9 ~ 11),展开度 η 的数值达到 1(见图 12),与表 2 中的绳网尺寸一致;但相较于四点牵拉模式,六点牵拉模式飞网有效作用时间及有效作用距离有所增加(见图 13、图 14)。

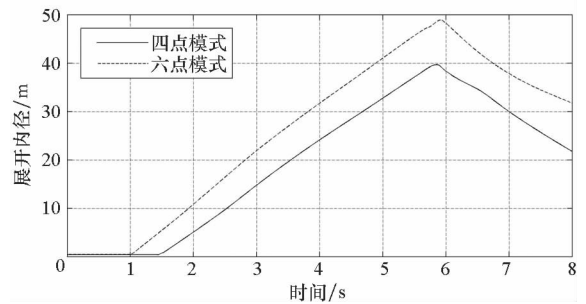


图 9 不同牵拉模式下绳网展开内径

Fig. 9 Internal diameter of space net

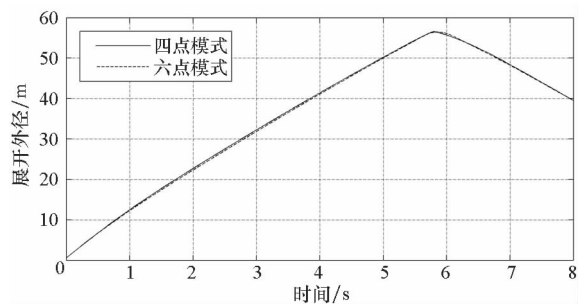


图 10 不同牵拉模式下绳网展开外径

Fig. 10 External diameter of space net

2)根据飞网系统力学性能指标分析可以看出,相较于四点牵拉模式,一方面六点牵拉模式绳网中的最大内力及平均内力均有显著下降(见图 15、图 16),绳网内力分布趋于均匀(见图 17);另一方面六点牵拉模式绳网的能量耗散有所升高(见图 18)。

总之,空间飞网系统六点牵拉模式所带来的

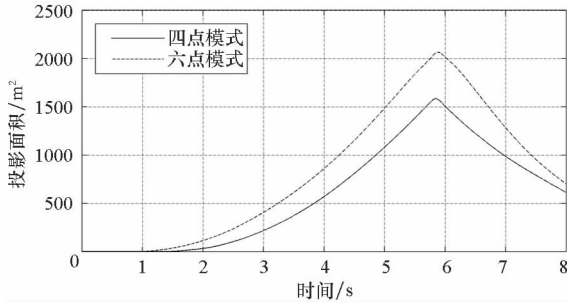


图 11 不同牵拉模式下绳网投影面积
Fig. 11 Projection area of space net

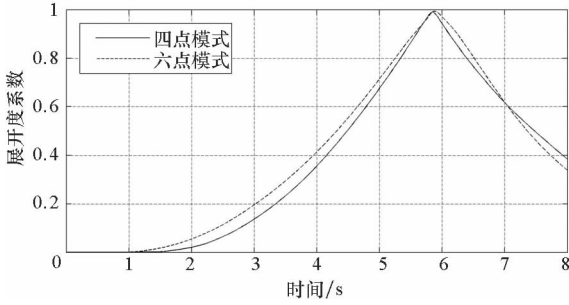


图 12 不同牵拉模式下绳网展开度系数
Fig. 12 Deployment coefficient of space net

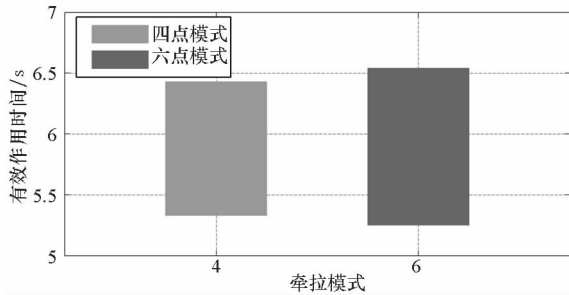


图 13 不同牵拉模式下绳网有效作用时间
Fig. 13 Active time of space net

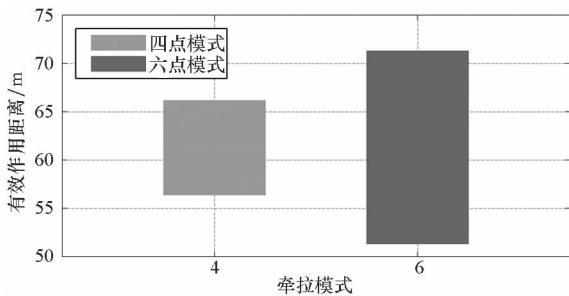


图 14 不同牵拉模式下绳网有效作用距离
Fig. 14 Active distance of space net

优点有:①绳网投影面积增大,有利于降低飞网系统对其他参数(如发射速度、角度)的敏感性,提高系统抗干扰能力。有利于提高系统捕获的成功率,降低抓捕的失效风险。②绳网内力分布更加均匀,降低绳网的自身震荡,减少绳网自身发生缠绕的可能性。

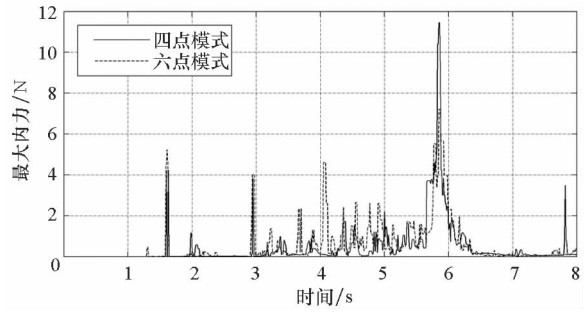


图 15 不同牵拉模式下绳网最大内力曲线
Fig. 15 Maximum internal force of space net

缺点是:①加剧了系统的能量耗散,能量利用率有所降低。②另一方面牵拉点数的增加必然带来质量块数目的增多,增加系统结构机构的复杂程度,影响系统工作的可靠性。

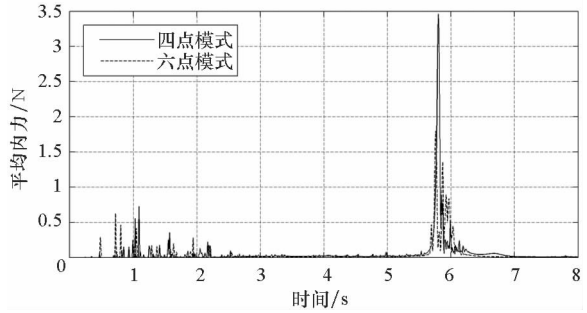


图 16 不同牵拉模式下绳网平均内力曲线
Fig. 16 Average internal force of space net

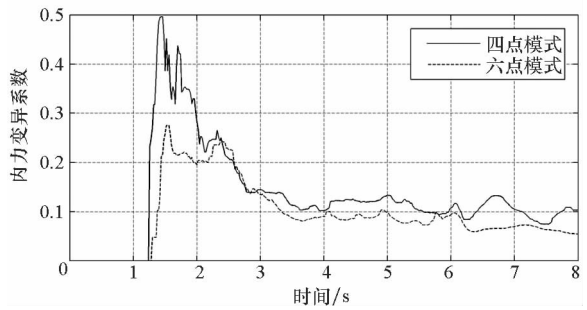


图 17 不同牵拉模式下绳网内力变异系数
Fig. 17 Variation coefficient of internal force of space net

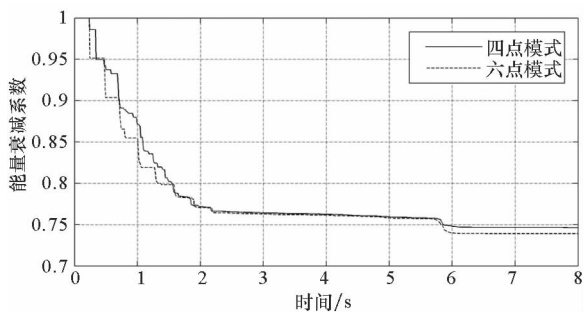


图 18 不同牵拉模式下绳网能量衰减系数
Fig. 18 Energy attenuation coefficient of space net

6 结论

对于空间飞网四点、六点牵拉模式下的拉出展开特性,首先基于质量弹簧阻尼模型建立飞网动力学模型并与地面试验进行比较;然后建立统一的评价指标,得到了不同牵拉模式下飞网的评价指标参数。

通过分析可以得到如下结论:

1)文中所建立的飞网拉出展开模型有效,可以用于空间飞网系统任务设计;

2)从飞网的飞行性能和力学性能看,六点牵拉模式优于传统的四点牵拉模式。

参考文献 (References)

- [1] Wormnes K, Letty R L, Summerer L, et al. Esa technologies for space debris remediation [C]//Proceedings of 6th European Conference on Space Debris, 2013.
- [2] Sinn T, McRobb M, Wujek A, et al. Results of REXUS12's suaineadh experiment deployment of a spinning space web in micro gravity conditions [C]//Proceedings of 63rd International Astronautical Congress, 2012.
- [3] Benvenuto R, Salvi S, Lavagna M. Dynamics analysis and GNC design of flexible systems for space debris active removal [J]. Acta Astronautica, 2015, 110: 247 - 265.
- [4] Lavagna M, Armellin R, Bombelli A, et al. Debris removal mechanism based on tethered nets: I - sairas [C]//Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2012.
- [5] Benvenuto R, Carta R. Active debris removal system based on tethered-nets; experimental results [C]//Proceedings of 9th Pegasus - AIAA Student Conference, Politecnico di Milano, 2013.
- [6] Benvenuto R, Lavagna M R. Flexible capture devices for medium to large debris active removal; simulations results to drive experiments [C]//Proceedings of 12th symposium on Advanced Space Technologies in Automation and Robotics Noordwijk, 2013.
- [7] Summerer L, Purcell O, Vasile M, et al. Making the first steps towards solar power from space-microgravity experiments testing the deployment of large antennas [C]. Proceedings of 60th International Astronautical Congress, Daejeon, 2009.
- [8] Gärdsback M, Tibert G. Optimal deployment control of spinning space webs and membranes [J]//Journal of Guidance Control and Dynamics, 2009, 32 (5): 1519 - 1530.
- [9] Gärdsback M, Tibert G. Deployment control of spinning space webs [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2009, 32 (1): 40 - 50.
- [10] Palmerini G B, Sgubini S, Sabatini M. Space webs based on rotating tethered formations [J]. Acta Astronautica, 2009, 65 (1/2): 131 - 145.
- [11] Sakamoto H, Natori M C, Kadonishi S, et al. Folding patterns of planar gossamer space structures consisting of membranes and booms [J]. Acta Astronautica, 2014, 94 (1): 34 - 41.
- [12] Haraguchi D, Sakamoto H, Shirasawa Y, et al. Design criteria for spin deployment of gossamer structures considering nutation dynamics [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010.
- [13] Bombelli A, Benvenuto R, Carta R, et al. Optimal design of a net-shaped space debris removal system [C]//Proceedings of 5th International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques, 2012.
- [14] 李京阳, 于洋, 宝音贺西. 空间飞网系统抛射参数优化研究 [J]. 宇航学报, 2012, 33 (6): 823 - 829.
LI Jingyang, YU Yang, BAOYIN Hexi. Projecting parameters optimization for space web systems [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33 (6): 823 - 829. (in Chinese)
- [15] 张青斌, 孙国鹏, 丰志伟, 等. 柔性绳网动力学建模与天地差异性分析 [J]. 宇航学报, 2014, 35 (8): 871 - 877.
ZHANG Qingbin, SUN Guopeng, FENG Zhiwei, et al. Dynamic modeling and difference analysis between space and ground for flexible nets [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35 (8): 871 - 877. (in Chinese)
- [16] 刘海涛. 空间绳网展开及复合体离轨动力学与控制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
LIU Haitao. Dynamics and control of space net deployment and combination reorbiting [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 于洋, 宝音贺西, 李俊峰. 空间飞网抛射展开动力学建模与仿真 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (5): 1289 - 1295.
YU Yang, BAOYIN Hexi, LI Junfeng. Modeling and simulation of projecting deployment dynamics of space webs [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31 (5): 1289 - 1295. (in Chinese)
- [18] 陈钦, 杨乐平. 空间绳网系统发射动力学问题研究 [J]. 宇航学报, 2009, 30 (5): 1829 - 1833.
CHEN Qin, YANG Leping. Research on casting dynamics of orbital net systems [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30 (5): 1829 - 1833. (in Chinese)
- [19] 赵国伟, 朱鸥宁, 徐云飞, 等. LS-DYNA 带单元在绳索体仿真中的应用研究 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32 (9): 1249 - 1253.
ZHAO Guowei, ZHU Ouning, XU Yunfei, et al. The application of LS-DYNA seatbelt element in net simulation [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32 (9): 1249 - 1253. (in Chinese)
- [20] 张玉军, 冯书兴. 空间碎片清理飞行器捕获系统设计与仿真 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2012, 23 (1): 84 - 88.
ZHANG Yujun, FENG Shuxing. Design capture system of space debris removal spacecraft and simulation [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2012, 23 (1): 84 - 88. (in Chinese)