

采用小弹性模量方法的空间飞网构型优化设计*

高庆玉,张青斌,唐乾刚,丰志伟

(国防科技大学空天科学学院,湖南长沙 410073)

摘要:飞网构型设计对提高空间飞网系统的展开抓捕性能具有重要意义。用小弹性模量分析方法对空间飞网构型优化设计问题进行研究。以绳网中内力分布均衡性为优化目标,选取飞网抛射过程中最大受力时刻为研究工况,赋予绳索单元极小弹性模量,进行静力学计算,并以变形后的结果为初始条件进行迭代分析。优化结果表明,绳网中的内力分布随迭代步数的增加而更趋于均匀。在不改变绳网拓扑结构的前提下,所建立的优化设计方法为空间飞网构型优化设计提供了一种参考途径。

关键词:太空垃圾;飞网捕获;动力学模型;小弹性模量法;构型优化

中图分类号:V423 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-001-05

Form optimization design of space net using small elastic modulus method

GAO Qingyu, ZHANG Qingbin, TANG Qiangang, FENG Zhiwei

(College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Form design of net can help to improve the opening and capturing quality of the space net system. The form optimization design problem of space net was studied based on small elastic modulus method. Internal force distributed in the net was selected as the optimization objective. The maximum stress state was chosen as the research condition and the rope was given minimum modulus elasticity. The iteration analysis was carried out using the results of deformation as the initial condition. Optimization results show that the internal force distribution of the rope net tends to be more uniform with the increase of the iteration steps. Without changing the premise of net topology structure, the established optimization design and method for the space net configuration optimization design and provides a means of reference.

Key words: space debris; net capturing; dynamic model; small elastic modulus method; form optimization

太空垃圾问题由来已久又具有越演越烈之势^[1]。研究表明,为了保证地球低轨道的正常使用每年需移除5~10颗废弃航天器^[2]。当前欧空局^[3-4]和美国^[1]、英国^[5-6]、日本的研究机构^[7]以及国内的相关学者^[8-13]正在着力开展太空垃圾清除的相关技术和方法研究。如空间绳系绳动力学^[9]、空间材料^[14]和张力控制^[15]等相关关键技术已经通过了地面环境试验或空间飞行试验验证。

空间网捕方案是太空垃圾清除的热点方案之一。绳网发射机构从网舱中发射一张捕获用绳网,绳网在角节点质量块的惯性牵拉作用下展开并完成对目标的抓捕过程^[16]。绳网在对目标实施捕获的过程中,当绳网触及目标时,在与目标的接触碰撞过程中,绳网瞬间张紧,绳索中的内力达到最大。不同的绳网构型决定了不同的绳网内力

分布,通过绳网的构型设计可以使绳网内力分布趋于均匀。

本文从柔性结构的优化找形原理出发,结合空间飞网力学分析模型,从飞网的展开力学性能尤其是展开过程中飞网内力分布的均匀特性入手,建立了采用最小弹性模量方法的空间飞网构型优化设计方法。

1 问题描述

1.1 空间飞网捕获过程

空间飞网捕获清除太空垃圾的任务过程可以描述如下:首先捕获拖船经过变轨调姿接近对准目标垃圾,而后向目标垃圾发射并展开绳网(由柔性绳索编织而成),绳网与目标发生碰撞后将其缠绕、包裹,在收口机构工作下,绳网网口逐步

* 收稿日期:2016-07-14

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

收紧,完成捕获过程。捕获完成后,捕获拖船、系绳、柔性网以及目标一起构成刚柔性物网复合体,拖船在附加推力器作用下,通过连接系绳将目标拖曳至坟墓轨道。

1.2 绳网受力状态

在空间飞网捕获发射任务准备阶段,柔性网折叠封储于绳网收纳舱内,绳网的四个角点分别连接一个质量块。发射器触发点火后,推动质量块以设定的发射角度、发射速度运动,绳网在质量块的牵拉下完成发射并展开。绳网的展开面积变化曲线如图 1 所示,当绳网展开面积大于最大面积 S_m 的 0.8 倍时(介于 t_a 与 t_b 之间),可以对目标实施有效捕获;绳网展开面积达到最大值 S_m 时,绳网绷紧,绳网中的内力值达到最大。

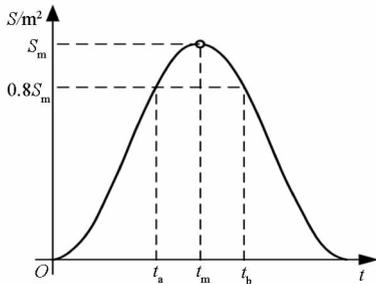


图 1 绳网展开面积性能指标

Fig. 1 Curve of space net deployment area

绳网是一种稀疏结构,展开后具有较大的尺寸,占据较大的空间。根据空间任务的要求,空间捕获绳网要求质量小、强度大、结构稳定且不容易发生缠绕。由前面的分析可知,绳网首次张紧瞬间为空间飞网展开过程中的最大受力状态,故研究此状态下绳网内力的分布情况并以此进行绳网构型优化设计是可取的。

2 绳网动力学

2.1 网格离散

空间捕获绳网采用多边形菱形网目,由网绳、边线绳和加强绳组成。采用离散化的建模思路对空间飞网的展开过程进行建模,将绳段单元等效为集中质量-阻尼-弹簧单元,柔性网则进一步简化为由绳集中质量-阻尼-弹簧单元连接的多体系统。如图 2 所示,建模过程如下:首先计算绳段上的单元张力,而后计算绳段单元所承受的外力,然后将外力施加到关关节点,最后联立绳网节点动力学方程,得到绳网系统的动力学方程。

2.2 动力学方程

已拉出绳段节点的运动由相应绳段上的绳索

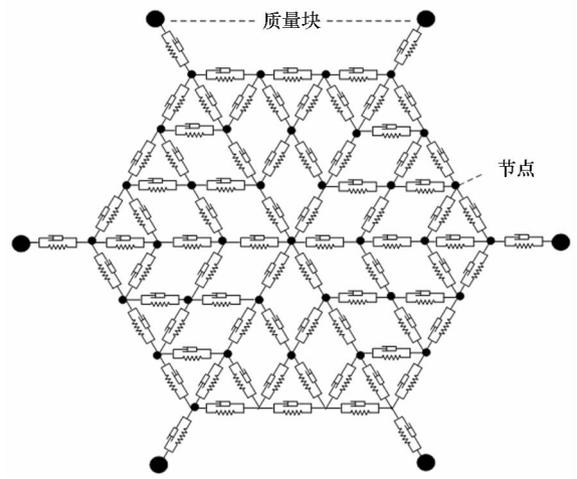


图 2 飞网简化模型

Fig. 2 Simplified model of flexible net

张力决定。

绳索单元 s_{ij} 的绳索张力 T_{ij} 近似为线弹性与线性阻尼之和,可由式(1)进行计算。

$$T_{ij} = \begin{cases} k_{ij}\varepsilon_{ij} + c_{ij}\dot{l}_{ij} & l_{ij} > l_{ij}^0 \\ 0 & l_{ij} \leq l_{ij}^0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_{ij}^0 为绳索单元 s_{ij} 的原始长度; $\varepsilon_{ij} = l_{ij} - l_{ij}^0$,为绳索单元长度的改变量; \dot{l}_{ij} 为绳索单元长度的变化率; k_{ij} 为绳索单元的等效弹性系数; c_{ij} 为绳索单元的等效阻尼系数。

绳段单元质量阻尼弹簧模型如图 3 所示, r_i , r_j 分别代表惯性系下节点 i, j 的位置矢量。

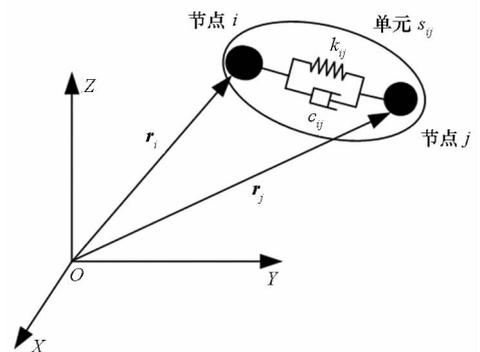


图 3 绳段单元质量阻尼弹簧模型

Fig. 3 Semi-spring damper model of tether segment

绳索单元 s_{ij} 的实际长度 l_{ij} 以及变化率 \dot{l}_{ij} 可利用式(2)进行计算。

$$\begin{cases} l_{ij} = \|r_j - r_i\| \\ \dot{l}_{ij} = (\dot{r}_j - \dot{r}_i) \cdot e_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

其中, e_{ij} 为由节点 i 指向节点 j 的单位矢量,即

$$e_{ij} = \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} \quad (3)$$

绳索单元 s_{ij} 的等效弹性系数由式(4)计算得到。

$$k_{ij} = EA_{ij}/l_{ij}^0 \quad (4)$$

式中, E 代表杨氏模量(材料属性量), A_{ij} 为绳索单元 s_{ij} 的横截面积。

绳索单元 s_{ij} 的等效阻尼系数为:

$$c_{ij} = 2\zeta\sqrt{m_{ij}k_{ij}} = 2\zeta\sqrt{\rho_{ij}EA_{ij}} \quad (5)$$

式中, m_{ij} 为绳索单元 s_{ij} 的质量, ζ 为绳索阻尼系数(由绳索材料和编织方式决定)。

定义 $conn\{i\}$ 为共用节点 i 的所有单元的集合, 已拉出绳索单元节点 i 的动力学方程可以在地心惯性系下表示为:

$$m_i\ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{T}_i = \sum_{j \in conn\{i\}} \mathbf{T}_{ij} \quad (6)$$

3 采用小弹性模量方法的构型优化方法

小弹性模量法是一种普遍采用的非线性有限元找形分析方法。在找形阶段把绳索材料的弹性模量缩小到一定的量级 ($1.0E-3$), 在找形结束后的荷载分析阶段, 再把绳索的弹性模量恢复至真实值。此方法具有更好的收敛性。采用小弹性模量法的构型优化过程如图4所示, 可描述如下。

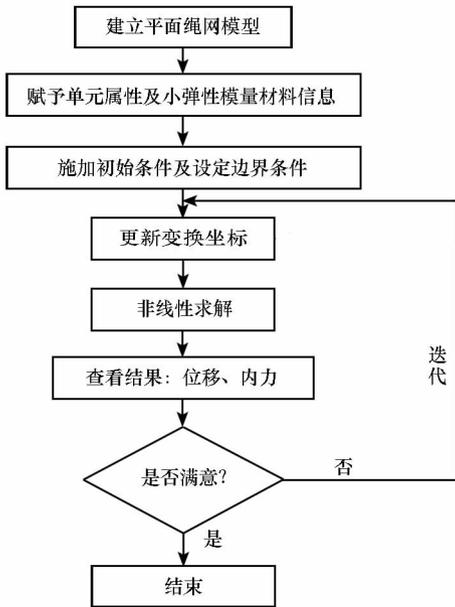


图4 绳网优化设计流程图

Fig. 4 Optimization design process of space net

- 1) 在一平面上建立空间飞网的有限元离散网格模型, 获得网格节点与单元之间的对应关系;
- 2) 赋予单元属性信息、材料属性信息(小弹性模量);
- 3) 施加常值初始载荷等初始条件并设定边界条件;
- 4) 更新坐标, 前一步的迭代结束后, 程序找

到一个内力相对均衡的绳网构型, 以此构型把所有节点的坐标更新, 得到相对均匀的绳网节点坐标;

5) 进行非线性分析选项设置并运行非线性求解计算;

6) 查看绳网中的内力分布情况;

7) 如果对过程6中的结果满意, 则结束绳网拓扑结构分析过程; 否则重新进入过程4更新变换坐标, 继续进行绳网的结构优化迭代过程。

飞网的内力分布情况用绳网最大内力、内力均值、内力方差以及内力变异系数来衡量。

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: 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) 内力方差: 绳段中内力的均方差, 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。

4) 内力变异系数: 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的归一化结果, 可以用于不同类型绳网内力分布的比较。

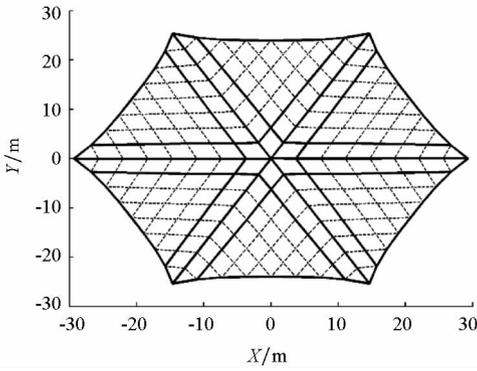
4 优化算例

算例中的飞网构型为正六边形平面菱形网(即网格为菱形网目), 绳网由呈正六边形分布的边线绳、呈“*”形分布的强绳以及网绳三部分组成, 网目呈菱形, 由中心向外呈辐射式排列。

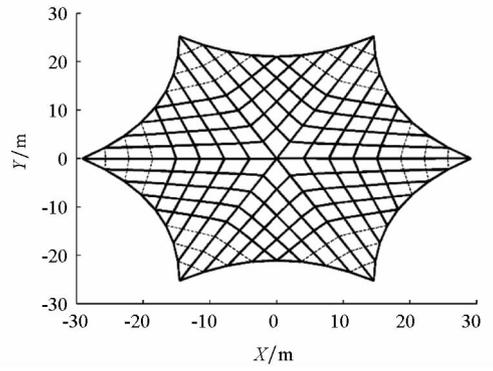
选取 kevlar49(密度为 1.44 g/cm^3 , 弹性模量为 200 GPa) 为绳索材料, 泊松比为 0.3 , 各绳索半径均为 0.8 mm 。

绳网中心点施加固定端约束, 六个顶点施加面内指向外侧的 141.4 N 集中载荷。

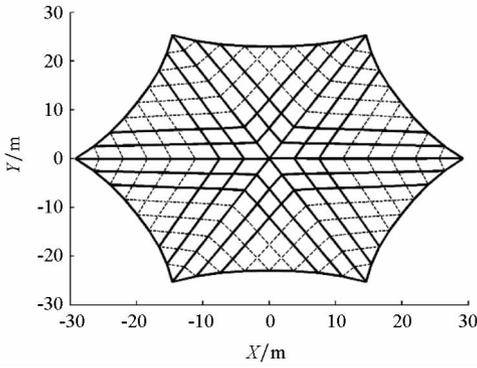
优化过程中绳网中的内力分布结果如图5所示, 图5中的实线代表内力数值落在 $[0.9 f_a, 1.1 f_a]$ 内的单元, 虚线代表未能落入此区间的绳段单元, 其中 f_a 代表绳网中的内力均值。可以看出, 随迭代次数的增加, 落入均值附近区间的绳段单元数量逐步增加, 表明绳网中的内力分布更加均匀。进一步将绳网单元区分为外侧边线绳单元、“米”字形加强绳单元和普通网绳单元三个部分, 图6~8给出了三部分绳网单元中的最大内力优化结果。从图中可以看出, 加强绳和边线绳单元内力最大值随迭代次数的增加而减小, 网绳中的最大内力值随迭代次数的增加而增大, 增大趋势随迭代次数的增加趋于平缓。图9给出了绳网单元的内力均值优化结果, 结果表明优化使得绳



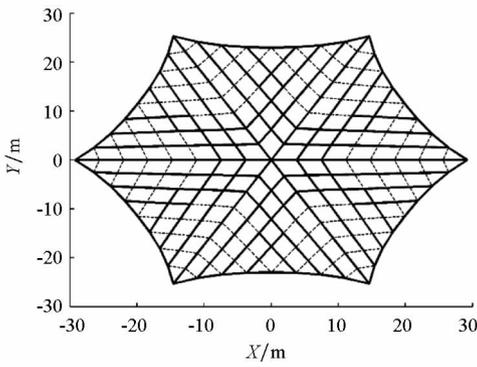
(a) 第 2 次迭代
(a) Iteration step 2



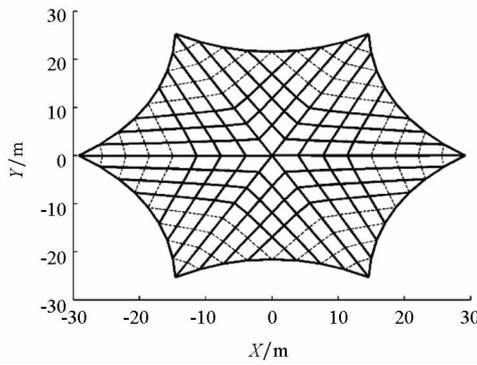
(e) 第 10 次迭代
(e) Iteration step 10



(b) 第 4 次迭代
(b) Iteration step 4



(c) 第 6 次迭代
(c) Iteration step 6



(d) 第 8 次迭代
(d) Iteration step 8

图 5 六边形绳网迭代网型及内力分布图

Fig. 5 Form and force distribution of hexagonal net

网中的平均内力数值提高。图 10 和图 11 分别为绳网中内力标准方差和变异系数的优化结果,结果表明绳网中的内力的标准方差及内力变异系数均随迭代次数的增加而减小,由第 3 节的标准方差及内力变异系数的定义可知,二者数值越小代表分布越均匀。

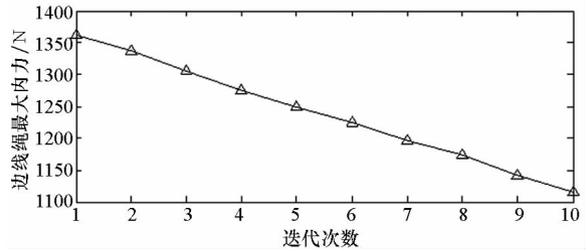


图 6 边线绳中最大内力的迭代结果

Fig. 6 Iterative results of maximum force in outside tether

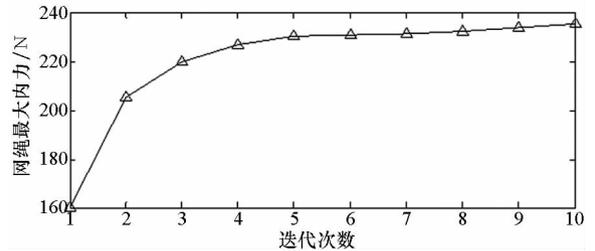


图 7 网绳中最大内力的迭代结果

Fig. 7 Iterative results of maximum force in net tether

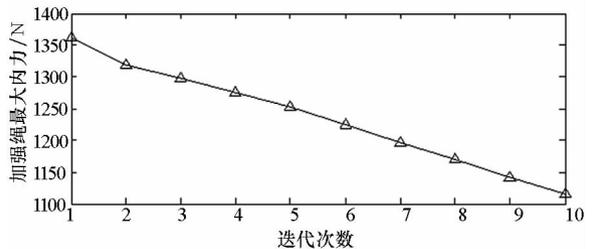


图 8 加强绳中最大内力的迭代结果

Fig. 8 Iterative results of maximum force in strengthen tether

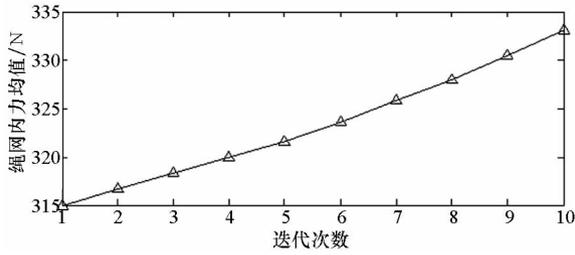


图9 绳网中内力均值的迭代结果

Fig.9 Iterative results of average of internal force

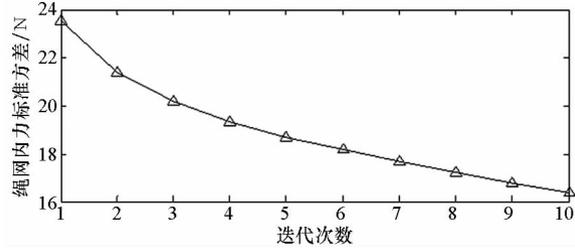


图10 绳网中内力标准方差的迭代结果

Fig.10 Iterative results of variance of internal force

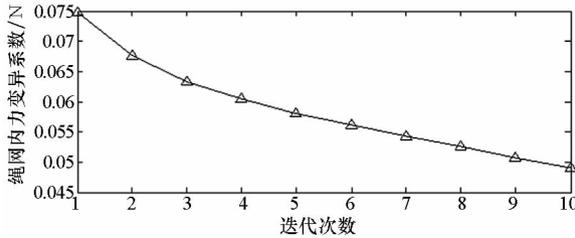


图11 绳网中内力变异系数的迭代结果

Fig.11 Iterative results of variation coefficient of internal force

总之,伴随迭代次数的增加,绳网中边线绳和加强绳中的内力逐渐减小,网绳中的内力逐渐增加,内力分布趋于均匀,同时内力均值增大。

5 结论

空间飞网构型设计决定绳网中内力的传递与分布,直接影响绳网的飞行性能。论述了一种基于小弹性模量方法的空间飞网构型优化设计方法,得到以下结论:

- 1) 本文的优化方法并不改变绳网的拓扑结构,属于一种同胞变换;
- 2) 采用本文的方法可以得到内力分布更均匀的绳网构型设计;
- 3) 伴随迭代次数的增加,绳网内力分布更加均匀,但绳网的有效捕获面积等其他指标减小,迭代次数的具体数值应参考其他指标进行多目标优化设计。

参考文献 (References)

[1] Imburgia J S. Space debris and its threat to national security: a proposal for a binding international agreement to clean up the junk[J]. Vanderbilt Journal of Transnational Law, 2011,

44(3): 589.

[2] Wormnes K, Le Letty R, Summerer L, et al. ESA technologies for space debris remediation[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris, 2013.

[3] Meyer J C, Scheper M, Mato J V, et al. Design and development plan of a tentacles based clamping mechanism for active debris removal[C]//Proceedings of the 13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation, 2015.

[4] Chiesa A, Fossati F, Gambacciani G, et al. Enabling technologies for active space debris removal: the cadet project [C]// Proceedings of the 7th IAASS Conference, 2015; 29-38.

[5] Gärdback M, Tibert G. Deployment control of spinning space webs[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2009, 32(1): 40-50.

[6] Sinn T, McRobb M, Wujek A, et al. Lessons learned from REXUS12'S suaineadh experiment spinning deployment of a space web in milli gravity[C]//Proceedings of the 21st ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 2013: 329-338.

[7] Nakasuka S, Aoki T, Ikeda I, et al. "Furoshiki satellite"—a large membrane structure as a novel space system[J]. Acta Astronautica, 2001, 48(5/6/7/8/9/10/11/12): 461-468.

[8] 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)

[9] 刘海涛,张青斌,杨乐平,等. 空间绳网系统展开动力学特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3): 68-77. LIU Haitao, ZHANG Qingbin, YANG Leping, et al. The deployment dynamic characteristics analysis of space web system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(3): 68-77. (in Chinese)

[10] Huang P F, Hu Z H, Zhang F. Dynamic modelling and coordinated controller designing for the manoeuvrable tether-net space robot system [J]. Multibody System Dynamics, 2016, 36(2): 115-141.

[11] Zhai G, Qiu Y, Liang B, et al. Modeling and simulations of orbital capture with space tether-net system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 16(2): 172-178.

[12] 王班,易琳,郭吉丰. 空间绳网机器人的战力控制机构研制与性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(10): 1974-1981. WANG Ban, YI Lin, GUO Jifeng. Performance study and development of tether control mechanism for space tethered-net robot [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(10): 1974-1981. (in Chinese)

[13] 刘彤,王成,戴树岭. 空间绳系飞网运动建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 52-55. LIU Tong, WANG Cheng, DAI Shuling. Dynamic modeling and simulation of space tether net[J]. Computer Simulation, 2010, 27(7): 52-55. (in Chinese)

[14] Carroll J A. Space transport development using orbital debris final report on NIAC phase I[R]. Chula Vista, 2002.

[15] 刘海涛. 空间绳网展开及复合体离轨动力学与控制[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014. LIU Haitao. Dynamics and control of space net deployment and combination reorbiting [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

[16] 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)