

空间飞网地面碰撞试验与仿真*

甄明, 杨乐平, 张青斌

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 设计了空间飞网地面碰撞试验系统, 并将碰撞试验结果与有限元仿真结果进行比较分析, 对碰撞过程中的碰撞力和绳段内力进行分析。研究表明: 试验结果与仿真结果吻合较好, 这验证了仿真模型的有效性; 飞网碰撞目标后产生的约束张力有利于收拢包裹目标; 飞网的柔性特征可有效缓解碰撞效应, 但碰撞区域绳段易产生断裂破坏。

关键词: 空间飞网; 碰撞试验; 仿真模型; 碰撞效应

中图分类号: V416.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2018)05-171-06

Ground impact test and its simulation of space net

ZHEN Ming, YANG Leping, ZHANG Qingbin

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

Abstract: A ground impact test of space net was designed and conducted. Then the simulation of ground test was established and the comparisons of ground test and simulation results were analyzed. The impact force and tether tension of space net during impact process were investigated based on the simulation. The results show that: the simulation results agree well with the ground test results, which indicates the reliability of simulation model; the constraining tension of space net during impact process can well make the space net close up and wrap the target; the flexibility of space net can well mitigate the impact response and the tethers in impact area are more likely to fracture during impact process.

Key words: space net; impact test; simulation model; impact response

随着空间活动的不断发展, 空间垃圾不断增加^[1], 严重影响了空间探索研究和有限的空间轨道资源。对此, 众多学者和研究部门提出了机械臂^[2]、空间飞叉^[3]和空间飞爪^[4]等措施对空间垃圾进行捕捉和移除, 但以上方法需要较高的控制精度, 且在捕获过程中伴有刚性碰撞, 可能产生二次垃圾。欧空局在2001年首次提出了利用柔性飞网结构捕获移除地球静止轨道废弃卫星的方案^[5]; 随后, 空间柔性飞网因其轻质、捕获精度要求低、能有效避免直接刚性碰撞等优势而受到广泛关注^[6]。

很多学者对飞网拉出展开过程进行了深入研究, 如飞网拉出展开过程的动力学模型^[7]、网型设计及动力学特性研究^[8]、地面抛射试验研究^[9]和飞网抛射参数对展开过程的影响研究^[10]等。但空间飞网捕获过程不仅包含飞网的拉出展开, 还涉及飞网对目标体的碰撞包裹过程。为此, Yu

等^[11]分别对三角形网目、四边形网目和六边形网目进行了静态和动态加载仿真, 评估和分析了飞网因碰撞引起的应力强度大小。最近, Benvenuto等^[6]采取罚刚度碰撞方法仿真了飞网捕获目标体过程中的飞网姿态变化; 张江^[12]采用 Hertz 碰撞理论对飞网进行了碰撞动力学建模和仿真, 分析了捕获目标姿态和空间飞网形态对捕获过程的影响; Botta等^[13]也利用 Hertz 碰撞理论仿真了飞网碰撞过程, 着重研究了飞网弯曲刚度对仿真结果与仿真时间的影响。但是, 空间飞网与目标体之间的全柔性碰撞研究仍然不充分, 且现有研究多基于仿真模拟, 缺少相关试验验证, 不能有效描述空间飞网捕获目标体的碰撞过程。

1 试验设计

1.1 试验目的与原理

空间飞网的全柔性碰撞动力学过程对空间飞

* 收稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272345)

作者简介: 甄明(1989—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, E-mail: zhenming1989118@hotmail.com;

杨乐平(通信作者), 男, 教授, 硕士, 博士生导师, E-mail: ylp_1964@163.com

网的空间应用具有极大的工程意义,但空间飞网的空间试验成本巨大。因此,旨在利用飞网地面碰撞试验对飞网的碰撞仿真模型进行验证,并基于仿真模型对柔性飞网碰撞过程中的碰撞力和绳段张力进行分析,研究柔性飞网的碰撞动力学特性。

空间飞网属于大变形的多体柔性拓扑结构,绳段短细且数目多,试验中很难对其碰撞力和绳段张力进行测量。因此,首先采用双摄像机空间交会测量原理^[14],对飞网碰撞目标体过程中的整体位形变化进行三维光学成像,测量并记录四个质量球的位置参数信息;其次,基于飞网四个质量球的位置参数求得飞网碰撞过程中的网口面积和飞行距离变化并与仿真模型进行验证分析^[8]。

1.2 试验方案与装置

试验系统组成如图 1 所示,主要包括托架释放系统、模拟目标体和高速摄像系统。首先,通过试验架将飞网托架悬在空中,飞网托架用来悬挂飞网质量球,托架四个端口分别安装舵机,用于控制飞网四个质量球的同步释放,飞网是完全展开的;其次,在飞网中心正下方放置模拟目标体;最后,在试验架一侧安装两台高速摄像机,摄像机之间有一定的距离,选择合适的镜头,调整拍摄的视场区域,使得待测飞网及目标体位于两个摄像机的视场内。

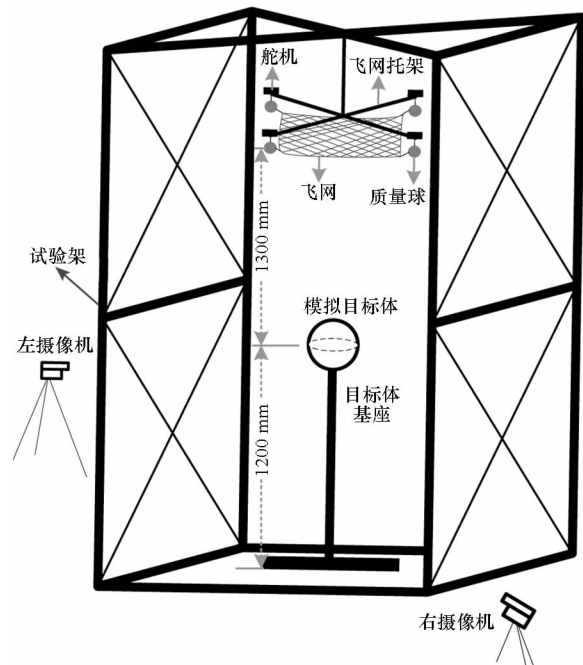


图 1 试验系统组成

Fig. 1 System of ground impact test

飞网网型如图 2 所示。飞网采用菱形网目,飞网边长为 900 mm,边线划分 9 个绳段,其中,每个边线绳段长 100 mm,牵引绳长 150 mm,内部绳段长 70.7 mm。飞网总质量为 20 g,质量球总质

量为 280 g,单个质量球为 70 g。此外,飞网与目标体中心垂直距离为 1300 mm,飞网与地面垂直距离为 2500 mm。绳段采用聚乙烯纤维材料,其材料参数见表 1^[15]。

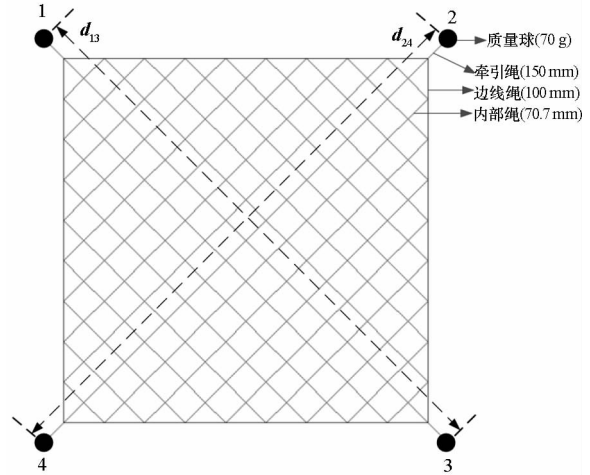


图 2 飞网网型

Fig. 2 Net geometry

表 1 飞网材料参数

Tab. 1 Material parameters of space net

| 抗拉强度/ GPa | 弹性模量/ GPa | 密度/ (kg/m ³) | 截面积/ mm ² |
|--------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|
| 3.1 | 100 | 970 | 5.4 |

1.3 试验结果

高速摄像机采样频率为 50 Hz,采取双目交会测量方式,对飞网从释放到碰撞包裹目标整个过程中的飞网位形进行成像记录,同时通过标定设备选取参考系,对飞网四个质量球的位置参数进行测量。

整个过程耗时 0.72 s,共获得 36 组测量数据,其中,选取 6 组飞网位形结果,如图 3 所示。每组测量数据包括两个图像,分别为左摄像机和右摄像机测量所得。由图 3 可知,飞网在 0 ~ 0.56 s 为自由下落过程;0.56 ~ 0.72 s 为飞网与目标体进行碰撞包裹的过程。飞网自由下落过程中,由于受到空气阻力作用,飞网逐渐呈凹形;当飞网与目标体接触碰撞后,飞网受到目标体的约束作用,飞网绳段迅速张紧,四个质量球在张紧绳段的拉力作用下开始收拢,对目标体进行包裹;在 0.72 s 时刻,四个质量球聚拢在一起。

同时,利用标定设备标定参考系,对四个质量球的位置参数进行测量,四个质量球的标定顺序如图 1 所示。通过对测量数据进行处理得到飞网下落距离及飞网网口面积^[8],具体数据将在第 2 节中进行详细阐述。

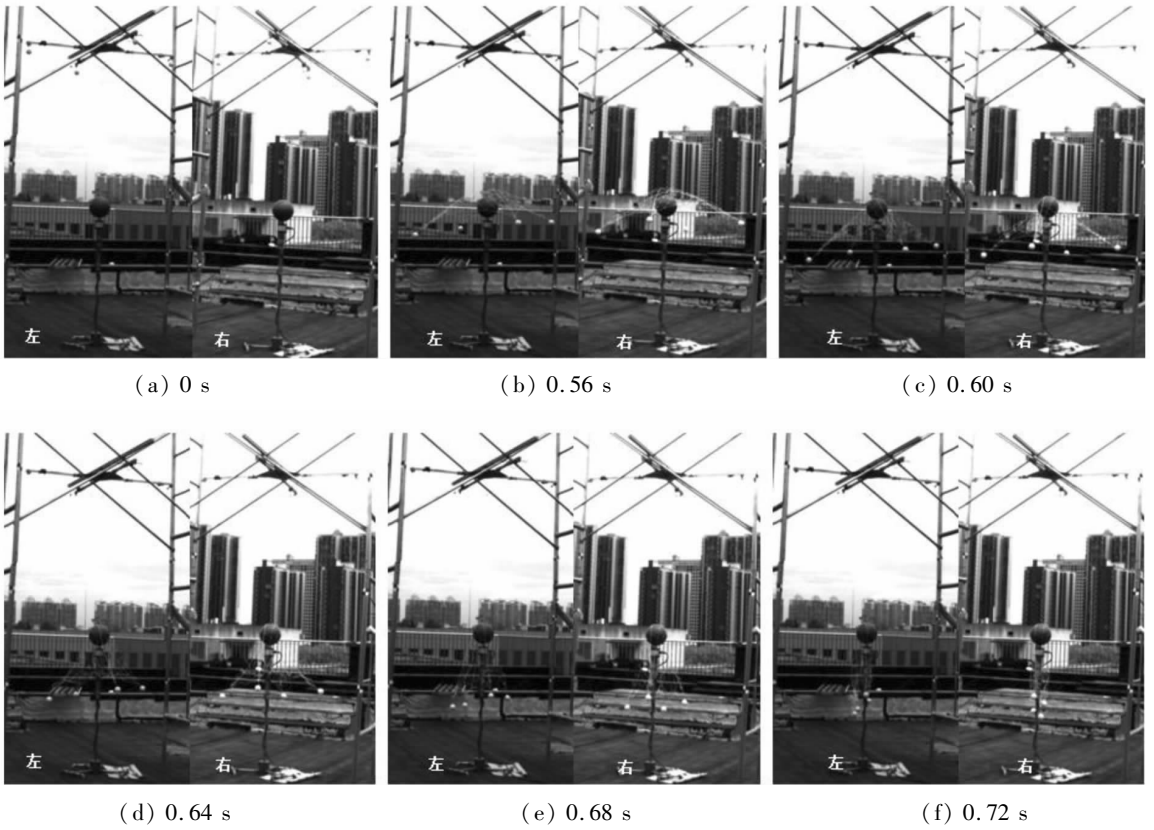


图3 飞网位形图

Fig. 3 Position and geometry of space net

2 仿真与试验结果分析

2.1 仿真模型

针对绳索的物理特性(只能受拉),选用 LINK167 单元进行模拟绳索。LINK167 单元多用于模拟索,与弹簧单元类似,仅能承受轴向的拉力,且在各个方向具有良好动力学特性。当且仅当绳段在拉紧时产生在单元上的力才是非零的,力的值由式(1)确定。

$$F = K \cdot \max(\Delta L, 0) \quad (1)$$

$$\Delta L = L - L_0 \quad (2)$$

$$K = \frac{E \times A}{L_0} \quad (3)$$

其中, ΔL 是长度的变化量, K 为绳索刚度, L 为绳索的当前长度, L_0 为绳索的初始长度, E 为绳索的杨氏模量, A 为绳索的截面积。本算例采用的绳索材料参数见表 1。

仿真模型中,假设质量球为质点模型,采用质量单元 MASS166 进行模拟。MASS166 单元是由一个单节点和一个质量值定义的,质量单元通常用于模拟一个结构的实际质量特性,没有包括大量实体单元和壳体单元,算例中质点模型质量为 70 g。

算例中模拟目标体为刚体,采用三维实体单

元 SOLID164 对模拟目标体进行全划分。SOLID164 单元可用于各向异性实体结构的 3D 建模,单元有 8 个结点,每个结点 3 个自由度。

有限元模型如图 4 所示,其中,飞网网格被划分为 1508 个单元,目标体网格被划分为 1339 个单元。飞网下落及碰撞包裹目标体的过程中可能存在飞网自身的碰撞和飞网与目标体之间的碰撞。针对飞网自身的碰撞,采用 LS-DYNA 中的自动接触类型(Contact_Automatic_Single_Surface);

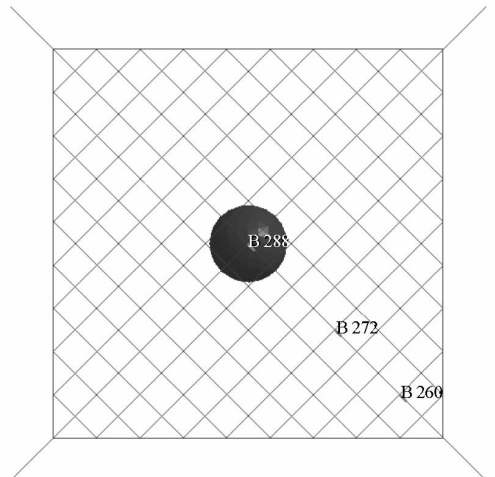


图4 飞网与目标体仿真模型图

Fig. 4 Simulation model of space net and target

碰撞过程中主要的碰撞形式是柔性飞绳与刚性目标体间的碰撞,采用点面接触中的自动接触(Contact_Automatic_Nodes_To_Surface),但在缺省情况下的接触效果并不理想,通过对参数罚因子进行控制,多次尝试,选择最佳组合。

2.2 仿真与试验结果验证

通过 ANSYS/LS-DYNA 对飞网地面碰撞试验进行仿真,选取碰撞过程中典型的飞网位形进行比较,如图 5 所示。飞网与目标体碰撞过程中,飞网仿真的整体位形变化与试验中飞网的位形变化吻合较好,说明仿真模型能较好地描述飞网与目标体碰撞后的飞网位形变化。

同时,试验还对四个质量球的位置参数进行了测量,通过四个质量球的位置数据对仿真和试验结果进行定量分析,进一步验证模型的可靠性。

对测得的四个质量球位置参数进行处理,得到飞网网口面积 $S_{网口}$ 和质量球下落距离 $d_{下落}$,作为描述飞网位形的指标^[8]。

$$S_{网口} = \frac{1}{2} |d_{13} \times d_{24}| \quad (4)$$

$$\begin{cases} d_{13} = d_3 - d_1 \\ d_{24} = d_4 - d_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{下落} = \frac{1}{4} |d_1 + d_2 + d_3 + d_4| \quad (6)$$

其中, d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 分别为四个质量球的位置矢量, d_{13} 和 d_{24} 为飞网的对角线矢量,如图 2 所示。

飞网网口面积和下落距离的仿真与试验对比结果如图 6 和图 7 所示。由图 5 可知,试验中的飞网由于受到空气阻力作用,渐成凹形,网口面积在飞网与目标体碰撞之前就开始小幅减小;当飞

网与目标体发生碰撞后,由于质量球受到飞网张力而迅速收拢,网口面积开始大幅减小。仿真算例中,网口面积在飞网与目标体碰撞之前保持常值;而在与目标体发生碰撞后开始迅速减小。由于空气阻力较小且不易测量,故在仿真过程中忽略了空气阻力作用,试验中飞网与目标体发生接触碰撞的时刻要晚于仿真算例,网口面积试验值与仿真值的误差约在 0.54 s 时刻达到最大,为 6.06%。由图 7 可知,由于空气阻力作用,飞网下落距离的试验值低于仿真值,约在 0.60 s 时刻误差达到最大,为 12.19%。总体而言,飞网网口面积和下落距离的试验值与仿真值误差较小,数据吻合较好。

综上所述,仿真模型能较好地描述飞网碰撞包裹目标体后的飞网位形变化。通过网口面积和下落距离的数据分析,进一步验证了仿真模型的合理性和可靠性。

2.3 碰撞力与绳段内力分析

由 2.2 节可知,模型能够较好地描述飞网与目标体的碰撞过程。基于仿真结果,本节将对飞网碰撞过程中的碰撞力及绳段内力进行分析。

飞网碰撞力变化情况如图 8 所示。飞网自由下落阶段,飞网未与目标体发生接触,碰撞力为零。当飞网与目标体开始接触碰撞后,碰撞力以振荡形式慢慢增大,这是因为 ANSYS/LS-DYNA 软件中的罚刚度相当于在两个碰撞体之间引入“弹性弹簧”,飞网与目标体之间的碰撞过程即弹簧不断压缩和回弹的过程,因此碰撞力呈现振荡变化。同时,飞网属于柔性结构,飞网与目标体的碰撞响应由于飞网的柔性特征而被缓解,即碰撞

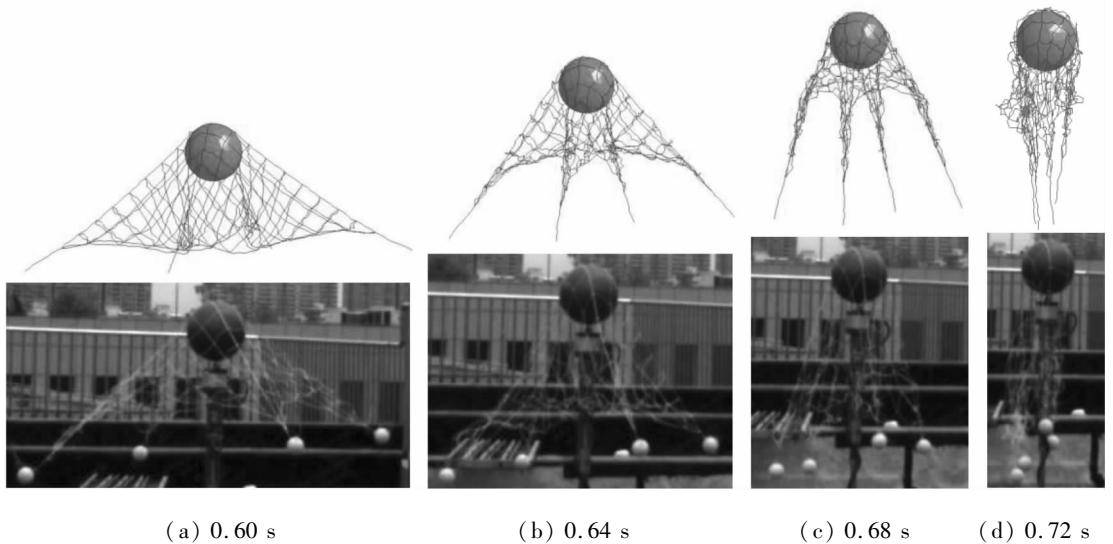


图 5 飞网位形仿真与试验对比图

Fig. 5 Comparison of net position and geometry between simulation and test

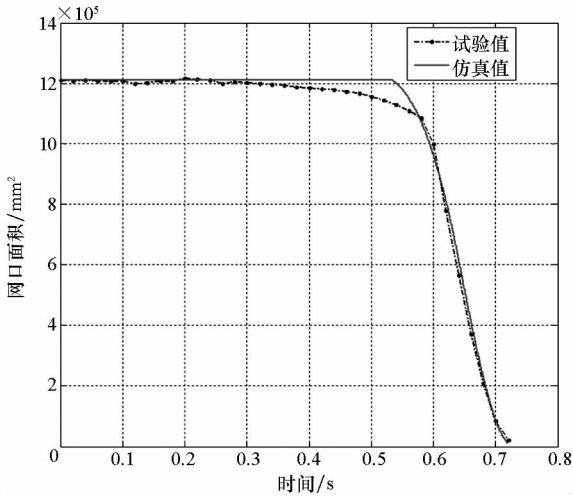


图 6 飞网网口面积仿真与试验对比图

Fig. 6 Comparison of net area between simulation and test

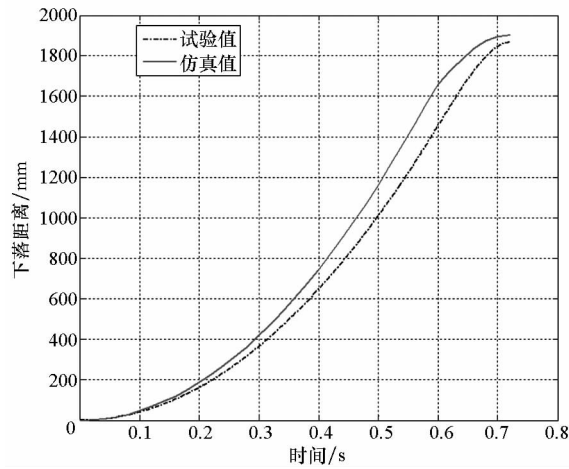


图 7 飞网下落距离仿真与试验对比图

Fig. 7 Comparison of flight distance between simulation and test

力呈缓慢增大趋势。约在 0.70 s 时刻,质量球基本处于聚拢状态,此时飞网主要冲量与碰撞接触面处于垂直状态,碰撞力达到峰值,而后碰撞力迅速减小到零。

同时,对飞网部分绳段单元内力进行分析。如图 4 所示,沿着飞网对角线由飞网中心向四周,分别采用绳段单元 288、绳段单元 272 和绳段单元 260 进行内力分析,其中绳段单元 288 处于飞网接触碰撞区域,绳段单元 272 和绳段单元 260 处于非接触碰撞区域。如图 9 所示,飞网自由下落阶段,飞网未与目标体发生接触,绳段内力为零。当飞网与目标体发生接触碰撞后,绳段单元表现为不连续的间断内力,这是因为绳索材料具有只能承受拉力、不能承受压力的特征,而飞网与目标体的接触碰撞过程中,绳段单元在松弛状态和张紧状态之间进行不断转换,所以绳段单元内

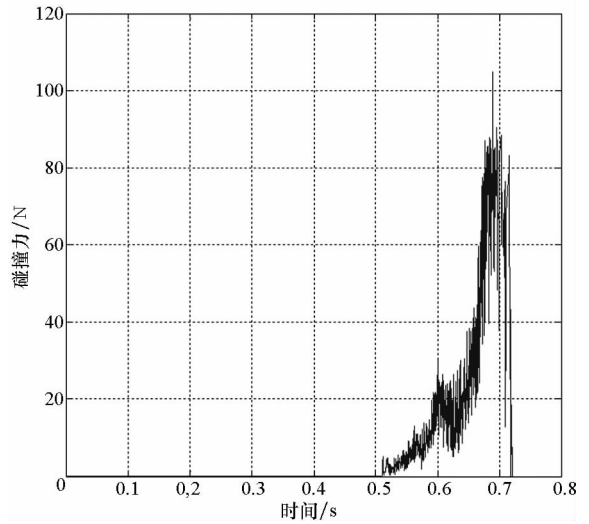


图 8 飞网碰撞力变化图

Fig. 8 Impact force of space net

力呈现不连续的间断变化。从图 9 还可以看出,三个绳段单元内力变化具有时间差,即单元 260、272 和 288 先后出现内力变化,而非同时发生内力变化,这是因为绳索材料具有延迟效应,即当绳索受到加载时,绳索中的内力和变形会以波的形式沿绳索传播,造成绳段不同位置的内力变化出现时间差。单元 288 的内力峰值比单元 260 和单元 272 大。

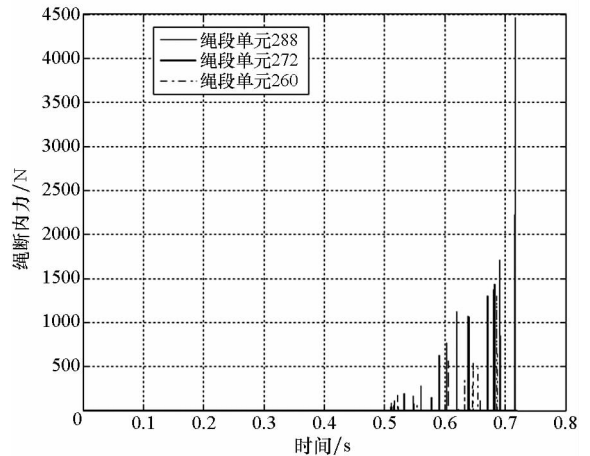


图 9 飞网绳段内力变化图

Fig. 9 Internal force of silk

飞网下落碰撞过程可类似于 Hopkinson 落重试验^[16-17],如图 10 所示,飞网与目标体接触碰撞端相当于 Hopkinson 落重冲击试验的 B 端,即边界固定端,飞网质量球端相当于 Hopkinson 落重冲击试验的 A 端,即冲击加载端。在 Hopkinson 冲击试验中,铁丝受冲击而被拉断的位置不是冲击端 A,而是固定端 B,即固定端 B 处的应力值大于冲击端 A。在本文中,单元 288 处于边界固定

端 B 位置,而单元 272 和 260 处于冲击加载端 A 位置,单元 288 的内力峰值大于单元 260 和单元 272,这一分析结果与 Hopkinson 落重冲击试验结果相吻合,即飞网碰撞过程中,绳索易被拉断的位置处于边界固定端 B 的位置。

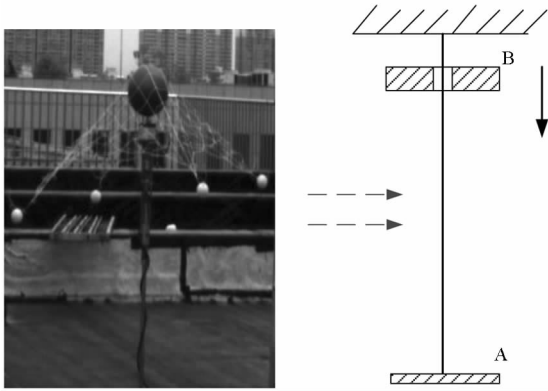


图 10 飞网地面碰撞试验与 Hopkinson 落重冲击试验类比图

Fig. 10 Comparison of ground impact test and Hopkinson's experiment

3 结论

1) 飞网与目标体发生碰撞后,飞网在目标体的约束下会对质量球产生牵引作用,使得质量球依靠飞网牵引进行聚拢动作,达到包裹收口的效果。

2) 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行仿真,并通过试验校验论证了仿真模型的可靠性,为飞网碰撞包裹目标体提供了一种合理可行的仿真方法。

3) 飞网碰撞目标体过程中,碰撞力由于飞网的柔性特征可有效缓解,减小了因碰撞引起的毁坏效应;飞网绳段经历了反复的松弛和张紧过程,且碰撞区域绳段内力相对较大,更容易出现断裂等情况,这为飞网设计提供了一定的借鉴,如在飞网有效碰撞区域进行绳段加强措施等。

参考文献 (References)

- [1] Network USSS. Monthly number of objects in earth orbit by object type [Z]. Orbital Debris Quarterly News, 2013, 17(1): 8.
- [2] Debus T J, Dougherty S P. Overview and performance of the front-end robotics enabling near-term demonstration (FRIEND) robotic arm [C]//Proceedings of AIAA Infotech@ Aerospace Conference, 2009.
- [3] Reed J, Busquets J, White C. Grappling system for capturing heavy space debris [C]//Proceedings of 2nd European Workshop on Active Debris Removal, 2012.
- [4] Bischof B, Kerstein L, Starke J, et al. Roger-robotic geostationary orbit restorer [C]//Proceedings of 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003.
- [5] Astrium. Robotic geostationary orbit restorer (ROGER) phase a final report [R]. ROGSIBRE-FP Issue 1, 2003.
- [6] 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.
- [7] 陈钦, 杨乐平. 空间飞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 system [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 1829-1833. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 陈钦, 杨乐平, 张青斌. 空间飞网发射动力学建模仿真研究与地面试验 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 16-19.
CHEN Qin, YANG Leping, ZHANG Qingbin. Dynamics model and simulation of orbital net casting and ground test [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(3): 16-19. (in Chinese)
- [10] 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 [J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1289-1296.
YU Yang, BAORYIN Hexi, LI Junfeng. Modeling and simulation of projecting deployment dynamics of space webs [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1289-1296. (in Chinese)
- [11] Yu Y, Baoyin H X, Li J F. Dynamic modeling and analysis of space webs [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54(4): 783-791.
- [12] 张江. 空间绳网捕获过程碰撞动力学研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG Jiang. Contact dynamics of space net on capturing target [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [13] Botta E M, Sharf I, Misra A K, et al. On the simulation of tether-nets for space debris capture with vortex dynamics [J]. Acta Astronautica, 2016, 123: 91-102.
- [14] 晁志超. 摄像测量的温度补偿方法和位姿传递摄像机网络研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
CHAO Zhichao. Study on the temperature compensation of videometrics and pose relay camera network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [15] 杨丽丽. 不同结构高强度聚乙烯抗侵入过程的数值模拟 [D]. 天津: 天津工业大学, 2014.
YANG Lili. Simulations on the penetration of different UHMWPE fiber laminates [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2014. (in Chinese)
- [16] Hopkinson J. Further experiments on the rupture of iron wire [J]. Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society, 1872, 11: 119-121.
- [17] Hopkinson J. On the rupture of an iron wire by a blow [J]. Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society, 1872, 11: 40-45.